

UNIVERSITA KARLOVA V PRAZE

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

ÚSTAV PRO ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ



Hodnocení znečištění ovzduší přízemním ozonem na Šumavě

Assessment of ambient ozone pollution in the Šumava Mts.

Diplomová práce

Diplomant: Michal Fišer

Vedoucí práce: RNDr. Iva Hůnová, CSc.

srpen 2012

Prohlašuji, že předloženou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím dále uvedené literatury a souhlasím s jejím zapůjčením s podmínkou, že veškeré použité údaje budou řádně citovány.

V Praze dne

Fišer Michal

Poděkování:

Chtěl bych tímto poděkovat RNDr. Ivě Hůnové, CSc. za její ochotnou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Mgr. Aleně Černíkové, Ph.D. za pomoc při statistickém zpracování dat.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na komplexní zhodnocení koncentrací přízemního ozonu na Šumavě.

Meteorologická stanice Churáňov vykazuje jarní a letní maxima přízemního ozonu. Nejvyšší koncentrace jsou měřeny od dubna do června. Druhé maximum se objevuje v srpnu. Nejnižší hodnoty jsou zjišťovány od listopadu do ledna. Studované období zahrnuje 15 let (1995 – 2009). Průměrná roční koncentrace ozonu byla $79,4 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Nejvyšší hodnoty expozičního indexu AOT 40F byly zjištěny v roce 2006 (34,9 ppm.h) a v roce 2003 (32,9 ppm.h). Kritická hodnota pro AOT 40 F je 5 ppm.h.

V práci je určována závislost přízemního ozonu na vybraných meteorologických prvcích (teplota, úhrn srážek, vlhkost, rychlost větru a sluneční záření) a znečišťujících látkách (NO_x a NO_2) pomocí lineární regrese.

Neparametrický Mann Kendallův test byl použit pro detekci a odhad monotónního vývoje v časové řadě a pro studium je použit na ročních hodnotách: průměr, 98% kvantil a medián. Trend ročních koncentrací přízemního ozonu pomocí 98% kvantilu byl statisticky potvrzen na stanici Churáňov za období 1995 – 2009. Trendy přízemního ozonu u průměru a mediánu nebyly statisticky potvrzeny.

V práci je určen také víkendový efekt přízemního ozonu (vyšší koncentrace během víkendových dnů než v pracovních dnech).

Klíčová slova: přízemní ozon, AOT 40, časové trendy, Šumava, víkendový efekt

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on a comprehensive assessment of ambient ozone concentrations in the Šumava Mts.

Meteorological station Churáňov showed spring and summer maxima. The highest values were recorded between April and June each year. Second maximum appears in August. Minimal values were recorded during autumn and winter months, the lowest values appeared between November and January. Data from the 15-year period 1995 – 2009 were compared. The annual averaged concentration of ozone was $79,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

The highest AOT40F values within the entire measuring period were recorded in 2006 (34,9 ppm.h) and 2003 (32,9 ppm.h), the critical level for forest is 5 ppm.h.

In this thesis the dependence of surface ozone at selected meteorological factors (temperature, rainfall, humidity, wind speed and solar radiation) and pollution factors (NO_x and NO_2) such regression.

The non-parametric Mann–Kendall test has been developed for detecting and estimating monotonic trends in the time series and applied in our study at annual values: mean, 98th percentile and median. Trend in the annual value ozone 98th percentile was determined as statistically significant at Churáňov site during the 1995-2009 period. Trends in the annual ozone mean and median were determined as statistically not significant.

The thesis also focuses on weekend-effect of the ground-level ozone (higher ozone concentrations on weekends than on weekdays).

Keywords: surface ozone, AOT 40, time trends, the Šumava Mts., weekend-effect

Seznam zkratek

AIM	Automatizovaný imisní monitoring
AOT 40	Accumulated Exposure over Threshold of 40 ppb (kumulovaná expozice nad prahovou hodnotou 40 ppb)
CH ₄	Methan
CO	Oxid uhelnatý
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
EC	European Commission (Evropská komise)
EEA	European Environment Agency (Evropská agentura pro životní prostředí)
EU	European Union (Evropská unie)
GLRD	Global solar radiation (globální sluneční radiace)
CHKO	Chráněná krajinná oblast
CHOPAV	Chráněnou oblast přirozené akumulace vod
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change Mezinárodní panel pro změnu klimatu
ISKO	Informační systém kvality ovzduší
MS	Meteorologická stanice
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NO	Oxid dusnatý
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxidy dusíku
NP	Národní park
PAN	Peroxyacetylnitrát
PBN	Peroxybenzoylnitrát

PM ₁₀	Suspendované částice o průměru nepřesahujícím 10 µg.m ⁻³
r	Korelační koeficient
R ²	Koeficient determinace
SEČ	Středoevropský čas
SRN	Spolková republika Německo
UNECE	United Nations Enviromental Programme (Ekonomická komise Spojených národů pro Evropu)
UVABS	Ultrafialová absorpční spektrofotometrie
UTC	Universal Time CO-ordinated (světový čas)
VOC	Volatile Organic Compounds (těkavé organické látky)
WMO	World Meteorological Organization (Světová meteorologická organizace)

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Imisní limity přízemního ozonu pro ochranu vegetace</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 2 Imisní limity přízemního ozonu pro ochranu zdraví lidí</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 3 Přehled metod měření znečišťujících látek na MS Churáňov a jejich intervaly měření</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4 Meteorologické jevy sledované na stanici Churáňov.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 5 Průměrná teplota vzduchu na stanici Churáňov v období 2000 – 2009.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 6 Průměrný srážkový úhrn na stanici Churáňov v období 2000 – 2009.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7 Průměrná relativní vlhkost vzduchu na stanici Churáňov v období 2000 – 2009... </i>	<i>38</i>
<i>Tab. 8 Průměrné hodnoty GLRD na stanici Churáňov v období 2000 – 2009.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 9 Podíl dnů s koncentrací přízemního na Churáňově ozonu nad $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 10 Výsledné koeficienty Spearmanovy korelace</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 11 Statistická významnost (p-hodnoty) Spearmanovy korelace</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 12 Výsledky jednoduché lineární regrese doplněné koeficient determinace.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 13 Výsledné hodnoty vícenásobné lineární</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 14 Výsledky víkendového efektu přízemního ozonu</i>	<i>52</i>

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Schéma chemismu přízemního ozonu</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 Meteorologická stanice Churáňov.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3 Meteorologická stanice Churáňov, upraveno</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4 Histogram proměnné přízemní ozon (vlevo), histogram proměnné přízemní ozon po Box – Coxově transformaci (vpravo)</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5 Průměrné roční koncentrace přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996 – 2009.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 6 Roční chod přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1995 – 2009.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 7 Četnost dnů s letními a tropickými teplotami na stanici Churáňov v období 2000-2009.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 8 Průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996 – 2009</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 9 Hodnoty expozičního indexu AOT 40F na stanici Churáňov v období 1996 – 2009</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 10 Počet překročení cílového imisního limitu pro přízemní ozon ($120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na stanici Churáňov v období 1995 – 2009</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 11 Srovnání průměrných měsíčních koncentrací přízemního ozonu a oxidů dusíku na stanici Churáňov v období 1995 – 2009</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 12 Roční průměr, medián a 98% kvantil přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996 – 2009, doplněn o spojnicí trendu</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 13 Regresní závislost přízemního ozonu na GLRD</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 14 Regresní závislost přízemního ozonu na relativní vlhkosti vzduchu</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 15 Regresní závislost přízemního ozonu na úhrnu srážek</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 16 Regresní závislost přízemního ozonu na průměrné teplotě vzduchu</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 17 Regresní závislost přízemního ozonu na maximální teplotě vzduchu</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 18 Regresní závislost přízemního ozonu na NO_2.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 19 Regresní závislost přízemního ozonu na NO_x</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 20 Regresní závislost přízemního ozonu na průměrné rychlosti větru</i>	<i>50</i>

Obsah

Seznam zkratk

Seznam tabulek

Seznam obrázků

<u>1. Úvod</u>	12
1.1. Vznik a rozpad přízemního ozonu	12
1.2. Variabilita koncentrací přízemního ozonu	15
1.3. Trendy přízemního ozonu	15
1.4. AOT 40.....	16
1.5. Vliv přízemního ozonu na vegetaci a ekosystémy	17
1.6. Legislativa	18
1.7. Měření přízemního ozonu v České republice	20
1.8. Národní park a Chráněná krajinná oblast Šumava	20
1.8.1 Podnebí	22
1.9. Měření kvality ovzduší na meteorologické stanici Churáňov	24
1.10. Cíle	25
<u>2. Metodika</u>	25
2.1. Meteorologická stanice Churáňov	25
2.2. Získaná data.....	27
2.3. Použité metody	28
2.3.1. Korelace	28
2.3.2. Vícenásobná lineární regrese	29
2.3.3. Transformace dat u proměnné přízemní ozon.....	30
2.3.4. Mann – Kendalův test.....	31
2.4. Expoziční index AOT 40F	31
2.5. Víkendový efekt přízemního ozonu.....	32

<u>3. Výsledky</u>	33
3.1. Roční chod koncentrací přízemního ozonu	33
3.2. Charakteristika vybraných meteorologických jevů	36
3.3. Průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu	39
3.4. AOT 40F	39
3.5. Dny s koncentrací přízemního ozonu vyšší než $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	40
3.6. Maximální 8hodinové koncentrace přízemního ozonu.....	41
3.7. Srovnání koncentrací přízemního ozonu a NO_x	42
3.8. Mann – Kendallův test	42
3.9. Korelace	44
3.10. Regresní analýza	45
3.10.1. Jednoduchá lineární regrese	45
3.10.2. Vícenásobná lineární regrese	50
3.11. Víkendový efekt přízemního ozonu.....	51
<u>4. Diskuze</u>	53
<u>5. Závěr</u>	57
<u>6. Použité zdroje informací</u>	58
6.1. Použitá literatura.....	58
6.2. Internetové zdroje	64

1. Úvod

Přízemní ozon patří v současné době mezi nejvýznamnější škodlivé znečišťující látky v ovzduší. Zvýšené koncentrace mohou negativně působit na živé organismy (rostliny, zvířata, lidi), ale rovněž na různé materiály (textilie, nátěry, plastické hmoty aj.) Molekula ozonu (O_3) se skládá ze tří atomů kyslíku. Vzniká při působení atomárního kyslíku na molekulární kyslík.

Oblast Šumavy byla i v současné době je považována za jednu z nejčistších oblastí České republiky (ČR). Výsledky z měření meteorologické stanice Churáňov, od počátku zjišťování koncentrací přízemního ozonu v roce 1995, ukazují, že území Šumavy se řadí mezi oblasti v ČR, kde jsou dlouhodobě zjišťovány jedny z nejvyšších koncentrací přízemního ozonu na území ČR. S tím souvisí i možný fyto toxický potenciál přízemního ozonu na vegetaci, ekosystémy i škodlivé účinky na zdraví lidí na území Šumavy.

Přízemní ozon je označován za sekundární polutant, který nemá významný emisní zdroj. Jeho tvorba je vázána na přítomnost primárních prekurzorů. Mezi prekurzory se řadí oxidy dusíku (NO_x), kam patří oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2), dále pro vznik přízemního ozonu je důležitá přítomnost těkavých organických látek (VOC – volatile organic compounds), oxidu uhelnatého (CO) a methanu (CH_4).

Za ideální podmínky pro fotochemický vznik přízemního ozonu se označují meteorologické podmínky jako jsou vysoká intenzita slunečního záření, vysoká teplota vzduchu, nízká rychlost vzduchu, nízká relativní vlhkost vzduchu a absence atmosférických srážek (Finlayson – Pitts, Pitts, 2000).

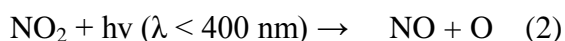
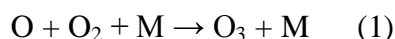
1.1. Vznik a rozpad přízemního ozonu

Přítomnost přízemního ozonu v troposféře je závislá na dvou základních postupech. První možností vzniku přízemního ozonu je výměna této škodliviny ze stratosféry přes tropopauzu do troposféry. Dominantním způsobem vytvoření přízemního ozonu spočívá v celé řadě komplikovaných fotochemických reakcí z prekurzorů NO_x a VOC za přítomnosti slunečního záření.

Vznik přízemního ozonu spočívá v adici atomu kyslíku v základním stavu na molekulu kyslíku za přítomnosti další nezávislé molekuly (obvykle N_2), která je nutná k vyrovnání energetických poměrů. (1)

V mezní vrstvě troposféry je produkce atomárního kyslíku zajištěna fotodisociací oxidu dusičitého za přítomnosti slunečního záření o vlnové délce nižší než 400 nm. (2)

Reziduální oxid dusnatý vytvořený z fotodisociace oxidu dusičitého rychle reaguje s vzniklým přízemním ozonem za opětovného vzniku oxidu dusičitého. (3)

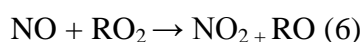
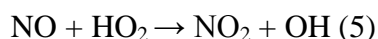
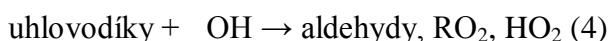


Reakce (1), (2) a (3) vedou k rovnovážnému stavu mezi jednotlivými složkami reakce a tudíž se rychlost vzniku přízemního ozonu (1) rovná rychlosti odstranění přízemního ozonu (3).

Reakce (2) převládá za dne, naopak reakce (3) převažuje v odpoledních a zejména v nočních hodinách.

V čistém ovzduší reakce (1), (2) a (3) nevedou ke kumulaci přízemního ozonu. Jiná situace nastává v prostředí, kde se nacházejí znečišťující látky v ovzduší. Rovnováha mezi produkcí a odstraněním přízemního ozonu je narušena v prospěch jeho vzniku a tím pádem k jeho zvýšené koncentraci.

Ke kumulaci přízemního ozonu dochází v případě, kdy je oxid dusnatý přeměněn jinými souběžnými reakcemi na oxid dusičitý bez odstranění přízemního ozonu. Při oxidaci oxidu dusnatého na oxid dusičitý je nahrazen přízemní ozon hydroperoxylovým radikálem (HO_2) (5) nebo organickým peroxylovým radikálem (RO_2) (6) např. methylperoxylovým radikálem (CH_3O_2), které jsou meziprodukty oxidace oxidu uhelnatého a methanu (Fiala, Závodský, 2003). Reakce (4) ukazuje oxidaci uhlovodíků OH radikálem za vzniku HO_2 a RO_2 .



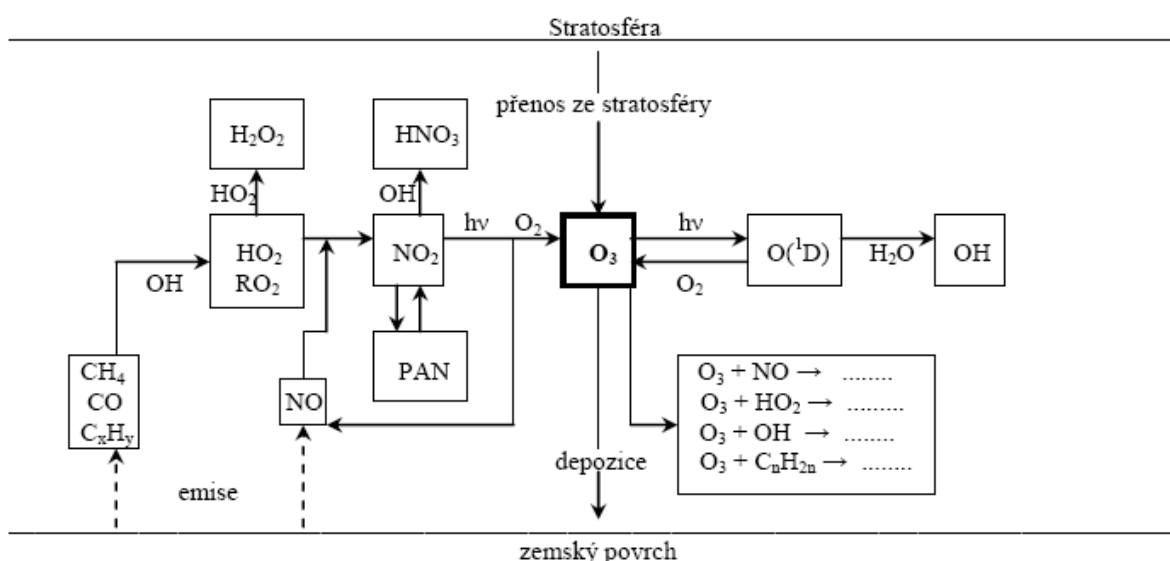
Bližší informace o chemismu přízemního ozonu jsou zobrazeny na obr. 1.

Dominantní příčinou úbytku přízemního ozonu je proces suché depozice následovaný destrukcí na povrchu. Mezi dva hlavní způsoby odstranění přízemního ozonu patří jednoduchý termodynamický rozklad a reakce ozonu s povrchem rostlin

(Fiala, Závodský, 2003).

Koncentrace přízemního ozonu nejsou závislé jen na absolutních koncentracích VOC a NO_x , ale závisí rovněž na vzájemném poměru mezi těmito látkami. Příznivé podmínky pro tvorbu přízemního ozonu se nachází při středních koncentracích 4:1 až 10:1 ($\text{VOC} : \text{NO}_x$). Poměr se v industrializovaném regionu evropského kontinentu příliš nemění, proto hlavním faktorem pro tvorbu přízemního ozonu jsou meteorologické podmínky (Vystrčilová, 1996; Fiala, Závodský, 2003).

Přízemní ozon je považován za ukazatel fotochemického smogu. K tvorbě tohoto komplexního polutantu, který je tvořen směsí plynů a aerosolů, je zapotřebí intenzivní automobilový provoz, který emituje primární prekursorů přízemního ozonu. Další důležitou složkou pro vznik je přítomnost slunečního záření, proto je rovněž označován za smog letní, protože se vyskytuje v teplé části roku. Další název pro tuto škodlivinu je smog losangeleský, neboť první informace o fotochemickém smogu pochází z města Los Angeles ve Spojených státech amerických, kde byly zjištěny negativní účinky koncentrací přízemního ozonu již v 50. letech 20. století. Pro své silné oxidační, agresivní, dráždivé a toxické účinky je též označován za smog oxidační. Dominantní složkou fotochemického smogu je přízemní ozon, který tvoří téměř 90% smogu. Mezi další polutanty, které se nacházejí ve fotochemickém smogu, patří např. peroxyacetylnitrát (PAN), peroxybenzoylnitrát (PBN) formaldehyd nebo peroxid vodíku (Stroh, 2004).



Obr. 1 Schéma chemismu přízemního ozonu (Závodský, Závodská, 1993)

1.2. Variabilita koncentrací přízemního ozonu

Koncentrace přízemního ozonu vykazují významnou časovou a prostorovou variabilitu, které je ovlivněna řadou faktorů, mezi nejdůležitější patří zeměpisná poloha, nadmořská výška, roční období, synoptická situace (Finlayson – Pitts, Pitts, 2000).

Přízemní ozon je typická škodlivina se sezonním chodem. Maximální hodnoty se měří během letní poloviny roku v období měsíců duben až září. Z měření vyplývá, že hodnoty přízemního ozonu vykazují dva typy chování koncentrací přízemního ozonu. U prvního typu dochází k maximálním koncentracím během jarních měsíců (duben – květen), která jsou typická pro oblasti vzdálené od emisních zdrojů znečištění ovzduší. U druhého typu dochází k maximálním koncentracím během letních měsíců (srpen – září), tyto hodnoty jsou naměřeny v obydlených a průmyslových oblastech, které jsou pod přímým vlivem prekurzorů přízemního ozonu (Monks, 2000). Nejnížší hodnoty jsou měřeny v zimních měsících roku.

Denní chod ozonu vykazuje minimální hodnoty před východem slunce, poté dochází k zvyšování koncentrací během dne vlivem promíchávání spodních vrstev vzduchu s vrstvami ležícími výše, ve kterých se nachází vyšší koncentrace přízemního ozonu vzniklého fotochemickými reakcemi. Maximální koncentrace jsou zjišťovány v odpoledních hodinách. Během letních měsíců dochází k výraznějšímu dennímu chodu. Denní variabilita na městských stanicích vykazuje odlišný chod koncentrací přízemního ozonu než na stanicích vzdálených od emisních zdrojů prekurzorů. Na městských stanicích lze vidět zřetelnější denní chod v důsledku rychlejší destrukce přízemního ozonu NO_x během nočních a ranních hodin. Na venkovských stanicích se nevyskytuje tak výrazný denní chod s vysokými rozdíly mezi nočními a denními hodinami jako na městských stanicích. Na venkovských stanicích, které se nachází ve vyšších nadmořských výškách můžeme nalézt vysoké koncentrace přízemního ozonu i během nočních hodin (Sundberg et al., 2006).

1.3. Trendy přízemního ozonu

Studie Finlayson – Pitts, Pitts (1997) uvádí, že koncentrace přízemního ozonu v preindustriálním období činily 10 až 15 ppb (1 ppb = 1, 997 $\mu\text{g.m}^{-3}$ při standardních atmosférických podmínkách 293,15 K a 1013,25 hPa). Řada studií např. Staechelin et al.

(1994), Stevenson (2001) uvádí, že současné koncentrace přízemního ozonu vzrostly dvakrát ve srovnání s přelomem 19. a 20. století. Ke stejnému závěru došli i Volz, Kley (1988), kteří uvádí dvojnásobné zvýšení koncentrací přízemního ozonu ve venkovské oblasti Montsouris nedaleko Paříže od konce 19. století.

Průměrné roční pozadové koncentrace přízemního ozonu v středních zeměpisných šířkách na severní polokouli se pohybují přibližně od 20 ppb do 45 ppb, rozdíly v koncentracích jsou dány v závislosti na zeměpisné poloze, nadmořské výšce a rozsahu antropogenního znečištění (Finlayson – Pitt, Pitts, 2000). Průměrné koncentrace přízemního ozonu vykazují na severní polokouli mírně rostoucí trend o 0,5 – 2% ročně (Vingarzan, 2004).

Koncentrace na jižní polokouli se pohybují mezi 30 – 40 ppb, nejnižší koncentrace byly zjištěny v tropické oblasti Tichého oceánu (10 – 20 ppb) (Gueiheirit et Roemer, 2000).

Dlouhodobé trendy přízemního ozonu jsou nejen ovlivněny emisemi prekurzorů, ale důležitou roli hrají meteorologické podmínky pro vznik ozonu.

Mezinárodní panel pro změnu klimatu (IPCC) vytvořil modely, v kterých naznačuje výrazný nárůst koncentrací přízemního ozonu během 21. století. V roce 2100 se odhaduje pozadová koncentrace přízemního ozonu 62 ppb, výsledná změna koncentrací přízemního ozonu je ovlivněna na použitém emisním scénáři (IPCC, 2001; Sitch et al., 2007).

Řada studií (např. Vingarzan, 2004) ukazuje, že dochází k poklesu maximálních koncentrací přízemního ozonu v důsledku snížení emisí prekurzorů. Navzdory tomuto poklesu se zvyšují střední hodnoty koncentrací přízemního ozonu v důsledku zvýšení pozadové koncentrace přízemního ozonu na severní polokouli. Příčinou zvýšení je dálkový přenos znečišťujících látek. Práce Yienger et al. (2000) a Fiore et al. (2002) ukazují, že transpacifický přenos znečišťujících látek z Asie zvýšil pozadové koncentrace přízemního ozonu na západě Spojených států amerických o 3 až 10 ppb.

1.4. AOT 40

Expoziční index AOT40 (Accumulated Exposure over Threshold of 40 ppb tj. kumulovaná expozice nad prahovou hodnotou 40 ppb) vytvořený v rámci kritických úrovní UNECE je nástrojem běžně používaným pro vymezení geografických oblastí s vegetací potenciálně ohroženou zvýšenými koncentracemi přízemního ozonu. Na území ČR se

koncentrace přízemního ozonu monitorují od r. 1992. Každoročně se počítá hodnota AOT40 pro lesy i zemědělské plodiny (Hůnová, Novák, 2001).

Tento limit se nezískává pouze z průměrné koncentrace přízemního ozonu, ale další důležitou součástí pro výpočet je expozice, která zohledňuje i dobu trvání koncentrací přízemního ozonu.

Kumulativní expozice AOT 40 se vypočte jako suma diferencí mezi hodinovou koncentrací přízemního ozonu a prahovou hodnotou 40 ppb, která při normálních atmosférických podmínkách (tlak 1013,25 hPa a teplota 293,15 K) odpovídá přibližně koncentraci $80 \mu\text{g.m}^{-3}$, pro každou hodinu, kdy byla překročena koncentrace 40 ppb. Výpočet AOT 40 se provádí každý den v rozmezí hodin 8:00 až 20:00 středoevropského času (SEČ), který odpovídá časové řadě 7:00 až 19:00 světového času (UTC – Universal Time Co-ordinated) za období vegetační sezony od 1. května do 31. července. Zjištěná hodnota se pak srovnává s limitní hodnotou expozice $18\,000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$, která je stanovena v příloze č. 1 k zákonu o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. Koncepce AOT40 je pokládána za jeden z nejlepších dostupných přístupů k vymezení geografických oblastí potenciálního ohrožení vegetace přízemním ozonem (Ashmore, Fuhrer, 2000), i přes jisté nedostatky jako je např. že nezahrnuje fyziologickou dávku přízemního ozonu rostlinou (Hůnová, Coňková, 2009).

V poslední době pro zjištění fyziologické dávky přízemního ozonu rostlinou využívá výpočet kumulovaného stomatárního toku (AFstY) přes určitou prahovou hodnotou ($Y \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Simpson et al., 2007).

Pro bližší hodnocení ekosystémů rozlišujeme expoziční index pro lesy AOT 40F a expoziční index pro zemědělské plodiny a přírodě blízká rostlinná společenství AOT 40C.

Kromě indexu AOT 40, který je více využíván v Evropě, existují rovněž i jiné expoziční indexy pro zhodnocení potenciálního ohrožení ekosystémů a vegetace koncentracemi přízemního ozonu. Jedná se např. o kumulativní indexy s různými prahovými hodnotami (SUM), který se využívají ve Spojených amerických státech.

1.5. Vliv přízemního ozonu na vegetaci a ekosystémy

Působení přízemního ozonu se projevuje nežádoucími účinky na vegetaci. Negativní vliv ozonu je způsoben jeho vysokou oxidační schopností, kterou je narušena funkce buněčných membrán a zároveň dochází ke vzniku dalších toxických produktů

(Ashmore, 2003).

Ozon proniká do rostliny průduchy a již v mezibuněčných prostorech se v kontaktu s vlhkými buněčnými stěnami velmi rychle rozkládá, čímž způsobuje poškození buněčných membrán a narušuje tak metabolismus. Jedním z hlavních škodlivých efektů ozonu je inhibice fotosyntézy přímým snižováním aktivity enzymů fixace oxidu uhličitého, při němž se rovněž snižuje i obsah chlorofylu (Uhlířová et al., 2003).

U rostlin způsobuje ozon poškození listů nebo jehličí. Výsledkem je červenohnědé zbarvení a také narušení fyziologických procesů důležitých pro život. Vlivem přízemního ozonu jde o ovlivnění již zmíněné fotosyntézy dále ovlivňuje dýchání a syntézy aminokyselin i mastných kyselin, tak i metabolismus bílkovin, tuků a cukrů (Symon et al., 1988). Část fotosyntetické produkce, ale také rezerv se uvolňuje na odstraňování oxidačního stresu a tím dochází k snižování celkové odolnosti proti dalším nepříznivým faktorům (Jones et al., 2004). Dalším negativním projevem přízemního ozonu na vegetaci je snížení celkové produkce a tím dochází rovněž k zastavování rozvoje kořenů a také ukládání zásobních látek (Lux et al., 1997).

Dlouhodobé působení ozonu může v ekosystémech dokonce způsobit potlačení a vymizení druhů citlivých k působení ozonu ve prospěch druhů odolnějších na vliv ozonu (Fuhrer et al., 1997; Ashmore, 2003).

1.6. Legislativa

Základní právní normou, která upravuje kvalitu ovzduší v České republice, je zákon o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. Zákon nabývá účinností 1. září 2012 a nahrazuje se tím zákon o ochraně ovzduší 86/2002 Sb .

Hodnoty imisního limitu pro přízemní ozon, které jsou uvedeny v příloze č. 1 k zákonu o ochraně ovzduší 201/2012 Sb., se shodují s limity ve směrnici Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES, o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu. V tab. 1 jsou zobrazeny imisní limity přízemního ozonu na ochranu vegetace a v tab. 2 imisní limity přízemního ozonu na ochranu zdraví lidí.

V příloze č. 6 k zákonu o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. jsou uvedeny informativní a varovné prahové hodnoty pro přízemní ozon k vyhlášení smogové situaci. Informativní prahová hodnota je považována za překročenou v případě, že alespoň na jedné měřící

lokalitě reprezentativní pro úroveň znečištění v oblasti minimálně 100 km² překročila hodinová koncentrace přízemního ozonu 180 µg.m⁻³. Pro vyhlášení varovné prahové hodnoty musí dosahovat hodinová koncentrace přízemního ozonu 240 µg.m⁻³ (201/2012 Sb., zákon o ochraně ovzduší).

Tab. 1 Imisní limity přízemního ozonu pro ochranu vegetace (201/2012 Sb., zákon o ochraně ovzduší)

Účel vyhlášení	Doba průměrování	Imisní limit
Ochrana vegetace	AOT 40, vypočten z 1h hodnot v období květen – červenec	18000 µg.m ⁻³ .h zprůměrováno za pět kalendářních let
Ochrana vegetace	AOT 40, vypočten z 1h hodnot v období květen – červenec	6000 µg.m ⁻³ .h

Tab. 2 Imisní limity přízemního ozonu pro ochranu zdraví lidí (201/2012 Sb., zákon o ochraně ovzduší)

Účel vyhlášení	Doba průměrování	Imisní limit
Ochrana zdraví lidí	Maximální denní 8h klouzavý průměr	120 µg.m ⁻³ nesmí být překročen ve více než 25ti dnech za kalendářní rok, zprůměrováno za tři kalendářní roky

1.7. Měření přízemního ozonu v České republice

V roce 2010 se zjišťovaly koncentrace přízemního ozonu na 74 místech v ČR (ČHMÚ, 2011). Měření na většině míst (57) provádí Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) na stanicích AIM (automatický imisní monitoring) s kontinuálním měřením. Na zbývajících stanicích jsou zjišťovány koncentrace přízemního ozonu zabezpečeny např. zdravotním ústavem nebo jednotlivými městy (Plzeň, Zlín, Olomouc aj.). Měření přízemního ozonu se provádí na území ČR již od roku 1993 (Hůnová, Coňková, 2009).

Referenční metodou, která se využívá na sledování koncentrací přízemního ozonu je ultrafialová absorpční spektrofotometrie (UVABS) o vlnové délce 254 nm (EC, 2002). Tato metoda spočívá v absorpci záření o vlnové délce 254 nm přízemním ozonem přítomným v analyzovaném vzorku. UV lampou se střídavě měří nulový (čistý vzduch) a vlastní vzorek v kyvetách (Ostatnická, 2007). Získaná data jsou validována a verifikována metodami QA/QC. Upravená data jsou uložena do centrální databáze ISKO (Informační systém kvality ovzduší). Výsledná data jsou každoročně publikována v ročenkách ČHMÚ (ČHMÚ, 2011).

1.8. Národní park a Chráněná krajinná oblast Šumava

Národní park a Chráněná krajinná oblast Šumava se rozprostírá podél státních hranic se Spolkovou republikou Německo (SRN) a s Rakouskem. Se svou rozlohou 68 520 ha je NP Šumava nejrozsáhlejším NP v ČR. Přírozené ochranné pásmo tvoří CHKO Šumava s rozlohou 94 500 ha. Na území Šumavy se nachází jeden z nejucelenějších lesních komplexů ve střední Evropě.

Na německé straně v délce 45 km navazuje na NP Šumava Nationalpark Bayerischer Wald (NP Bavorský les) s rozlohou 24 250 ha založen v roce 1970. Oba NP vytváří jeden z největších bilaterálních národních parků Střední Evropy.

Geologie

Šumava je součástí jádra Českého masívu, tzv. šumavskou větví moldanubika, které je tvořeno z převládajících hornin: ruly, svory, granulity a žuly. Krajinným typem se jedná o hornatinu, vyvrásněnou v paleozoiku a později zarovnanou v parovinu. Naposled byla Šumava vyzdvižena v terciéru jako důsledek saxonských pochodů. Nejvyšší horou

národního parku a české strany Šumavy je Plechý s nadmořskou výškou 1 378 m, dále Velká Mokrůvka (1 370 m) a Blatný vrch (1 367 m).

Hydrologie

V nadmořské výšce 1 162 m v blízkosti Černé hory pramení naše nejdelší řeka Vltava (430 km). Mezi další významné toky pramenící v oblasti Šumavy patří Otava, Úhlava, Blanice a Volyňka.

Území je významnou evropskou pramennou oblastí a proto bylo v roce 1979 vyhlášeno za chráněnou oblast přirozené akumulace vod (CHOPAV). Na území Šumavy leží osm glaciálních jezer (na německé straně Roklanské jezero, Malé a Velké Javorské jezero), největší a nejhlubší z jezer je Černé jezero s plochou 18,6 ha, dále Čertovo jezero (10,34 ha), Plešné jezero (7,48 ha), Prášilské jezero (3,72 ha) a nejmenší ledovcové jezero Laka (2,78 ha). Šumavská rašeliniště patří mezi nejrozsáhlejší komplexy postglaciálních horských rašelinišť s výskytem mnoha rašelinných jezírek (největší počet jezírek se nachází v Chalupské slati).

Podnebí

viz samostatná kapitola 1.8.1.

Fauna

Šumava je domovem původní středoevropské lesní zvěře. Z větších šelem je na území zastoupen pouze reintrodukovaný rys ostrovid (*Lynx lynx*). Mezi další významné zástupce fauny patří tetřev obecný (*Tetrao tetrix*) žijící na rašeliništích a otevřených mokřadech, dále tetřev hlušec (*Tetrao urogallus*), kde populace žijící na české a německé straně představuje poslední životaschopnou populaci v evropských středohorách.

Šumavu obývá i mnoho dalších vzácných druhů živočichů, jako jsou např.: datlík tříprstý (*Picoides tridactylus*), puštík bělohlavý (*Strix uralensis*), perleťovec mokřadní (*Proclossiana eunomia*), myšivka horská (*Sicista betulina*) aj.

Flóra

Převážná část území je řazena do oblasti hercynské květeny. Šumava je jádrem výskytu čtyř endemických taxonů se širším rozšířením v rámci Českoněmecké vysočiny. Jedná se o oměj šalamounek (*Aconitum plicatum*), hořeček mnohotvárný český (*Gentianella praecox subsp. bohemica*), zvonečník černý (*Phyteuma nigra*) a prstnatec májový rašelinný (*Dactylorhiza majalis subsp. turfosa*).

Mezi vzácné druhy bylin patří: šídlatka jezerní (*Isoëtes lacustris*), šídlatka ostnovýtrusná (*Isoëtes echinospora*), všivec žezlovitý (*Pedicularis sceptrum-carolinum*), hořec panonský (*Gentiana pannonica*) aj.

Ochrana přírody

V roce 1963 byla zřízena výnosem Ministerstva školství a kultury ČSR č.j. 53855/1963 na ploše 163 000 ha CHKO Šumava. Národní park byl vyhlášen nařízením vlády ČR č. 163/1991 Sb. v jádrové oblasti CHKO.

V roce 1990 byla CHKO a později i NP zařazen mezi biosférické rezervace v programu MAB UNESCO. Lokalita Šumavská rašeliniště patří do sítě lokalit evidovaných Ramsarskou konvencí. Šumava patří mezi významné ptačí oblasti a je zařazena do mezinárodní soustavy NATURA 2000.

1.8.1. Podnebí

Podle klimatického členění náleží většina Šumavy do chladné oblasti středoevropského typu podnebí. Pouze některá místa Šumavy (údolí Vltavy od Lenory a jižní svahy Želnavské hornatiny spolu s částmi Šumavského podhůří) zařazujeme do mírně teplé oblasti (Strnad, 2003).

Dalším ukazatelem podnebí je index termické kontinentality podle Gorczyńského vztahu, pokud do tohoto vztahu dosadíme potřebné údaje (zeměpisná šířka a roční amplituda teploty) získáme hodnoty pro MS Churáňov 17,6 % (Bednařík, 2002), Kvilda 17,4 % a Březník 15,4 % (Nekovář, 1966). Zjištěná data nám ukazují na přechodný charakter podnebí mezi oceánským a kontinentálním, v němž nalezneme poměrně malé roční výkyvy teploty a vysoké srážky se stejným rozložením během roku.

Pro bližší přiblížení podnebí Šumavy jsou krátce popsány základní meteorologické prvky zpracované dle Strnada (2003) jako jsou teplota vzduchu, srážky, vlhkost vzduchu, sluneční svit, směr a rychlost větru.

Teplota vzduchu

Průměrná roční teplota pro oblast Šumavy se pohybuje v závislosti na nadmořské výšce, a to od 6 °C (750 m n. m.) do 3 °C (1 300 m n. m.). K nejchladnějším místům na Šumavě patří Šumavské pláně, v této oblasti proběhly měření teplotní inverze, které se vytvářejí v jakékoliv roční době a při jakémkoliv typu povětrnostní situace (Křivancová, 1991; Křivancová, 1999). Měření teplotních inverzí proběhla v období let 1986 – 1997 na stanicích Jezerní slat' I , Jezerní slat' II a Churáňov.

Mezi nejteplejší měsíc patří červenec a naopak nejchladnější je leden. Absolutně nejvyšší naměřená hodnota činila 36,8 °C (27.7. 1983 v Kašperských Horách), nejnižší zaznamenaná teplota byla -41, 6 °C (30.1. 1987 na Jezerní slati).

Počet tropických dnů, kdy je maximální teplota 30 °C a vyšší, naměřených během třicetiletého období, byl celkem v pěti letech. Letní dny (teplota 25 °C a vyšší) se vyskytly každoročně vyjma roku 1979. Dny s maximální teplotou nad 20 °C jsou naměřeny nejčastěji v červenci, nejčastější výskyt těchto dnů byl v roce 1983 (59 dnů), nejméně v roce 1984 (18 dnů). Mrazové dny (-0,1 °C a nižší) se mohou vyskytovat denně během měsíců prosince, ledna a února. Ledové dny (maximální teplota do -0,1 °C) s nejvyšším počtem (94 dnů) byly zjištěny v roce 1956. Dny se silným mrazem s minimální teplotou -10,1 °C se vyskytovaly každoročně až na rok 1974. Dny s mrazem -20,0 °C se vyskytly v deseti letech během třicetileté periody. Arktické dny (maximální teplota -10,0 °C) byly naměřeny za sledované období v devatenácti letech.

Srážky

Oblast Šumavy lze rozdělit do tří srážkových pásem. První z nich leží na státní hranici se SRN, jedná se o tzv. návětrnou část Šumavy. Druhé pásmo se vyskytuje na vrcholových partiích Šumavy. Třetí pásmo s vrcholy Javorník, Libín, Blanský les s Kletí a s jejich severními a severovýchodními svahy se označuje jako tzv. závětrná část Šumavy, kde dochází poměrně největšímu zeslabení srážek během západní cyklonální povětrnostní situaci způsobené sestupnými proudy do vzdálenosti 20 až 40 km od státních hranic se SRN (Brádka, 1970). Nejnižší srážky jsou naměřeny v Podhůří Šumavy v oblasti vyznačeném městy České Budějovice – Vodňany – Volyně a v prostoru severně od Kaplice. Na množství spadlých srážek má vliv i působení alpského föhnu, který vydatnost srážek snižuje v teplé polovině roku a má vysušný vliv (Nekovář, 1966). Naopak nejdeštivějšími oblastmi jsou Březník (1 552 mm), Modrava (1 337 mm) a Světlé Hory (1 274 mm).

Zimní srážky tvoří v centrální oblasti Šumavy až 40 % z ročních srážek. Souvislá sněhová pokrývka leží v nejvyšších polohách příhraničního hřebene Šumavy 120 – 150 dnů.

Vlhkost vzduchu

Roční průměr relativní vlhkosti vzduchu se pohybuje kolem 80 % v převážné části

Šumavy. Nižší hodnotu lze nalézt na severovýchodním okraji a v nižších polohách. Roční kolísání je poměrně malé, maximum připadá na měsíc prosinec.

Sluneční svit

Délka slunečního svitu v zeměpisné poloze Šumavy kolísá od 8 hodin a 11 minut v prosinci do 16 hodin a 13 minut v době letního slunovratu.

Minimum slunečního svitu připadá dle dlouhodobého průměru na měsíce prosinec nebo listopad.

Směr a rychlost větru

Z měření (Coufal, 1963; Křivancová, 2002) provedených ve vrcholových partiích Šumavy na MS Churáňov lze říci, že směr převládajícího větru je WSW. Průměrná hodnota rychlosti větru za sledované období 1961 – 2000 činila $3,7 \text{ m.s}^{-1}$. Maximální denní nárazy větru za období 1981 – 2000 byly $12,5 \text{ m.s}^{-1}$.

1.9. Měření kvality ovzduší na meteorologické stanici Churáňov

Měření kvality ovzduší ČHMÚ na MS Churáňov probíhá již od roku 1988, které začalo zjišťováním koncentrací oxidu siřičitého a síranových iontů. Měření bylo prováděno manuálními metodami až do roku 1994, kdy bylo nahrazeno automatickým měřením.

Od roku 1994 bylo sledování koncentrací u škodlivých látek rozšířeno automatickým měřením o koncentrace oxidů dusíku. V roce 1995 bylo měření rozšířeno o zjišťování koncentrací aerosolu frakce PM_{10} a vzhledem k nadmořské výšce také o sledování přízemního ozonu. Bližší seznam znečišťujících látek měřených na MS Churáňov a jejich metody zjišťování s intervaly měření jsou zobrazeny v tab. 3.

Na MS Churáňov jsou zjišťovány koncentrace přízemního ozonu pomocí ultrafialového fotometrického analyzátoru ozonu značky Thermo Electron Instruments model 49.

Bližší popis používaných metod při monitorování kvality venkovního ovzduší na MS Churáňov je uveden ve Fiala, Ostatnická eds. (2003).

Tab. 3 Přehled metod měření znečišťujících látek na stanici Churáňov a jejich intervaly měření (Fory et al., 2009)

Znečišťující látka	Metoda měření	Interval měření
O ₃	UV - absorpce	1 h
SO ₂	UV - fluorescence	10 min, 1 h
NO, NO ₂ , NO _x	chemiluminiscence	1 h
PM ₁₀	gravimetrie	24 h odběr 2x za 3 dny
As, Cd, Cu, Mn, Ni, Pb	Hmotnostní spektrofotometrie s indukčně vázanou plazmou	24 h odběr 2x za 3 dny

1.10. Cíle

Využít data z dlouhodobého (1995 – 2009) monitoringu přízemního ozonu na meteorologické stanici Churáňov pro získání informací o chování přízemního ozonu na Šumavě.

Cílem diplomové práce je určit dlouhodobé trendy, sezónní variabilitu, víkendový efekt a vazbu na jiné meteorologické parametry a prekurzory přízemního ozonu.

Dalším cílem je určit fytotoxický potenciál přízemního ozonu.

2. Metodika

2.1. Meteorologická stanice Churáňov

MS Churáňov (obr. 2) se nachází na území CHKO Šumava se souřadnicemi 49°04'06" severní šířky a 13°36'54" východní délky v nadmořské výšce 1 118 m (obr. 3).

Vznik MS je datován rokem 1952, kdy se stala součástí projektu jednotné profesionální pozorovací sítě na území Československé republiky. Jedním z důvodů zřízení MS bylo zajistit rovnoměrné rozmístění stanic po celé republice a reprezentativní umístění stanice vzhledem k lidské činnosti.

Na MS se provádí sledování vybraných klimatologických prvků jako jsou: teplota

vzduchu, množství srážek, vlhkost vzduchu, sluneční záření, směr a rychlost větru.

Dle klasifikace EoI se řadí MS Churáňov mezi přírodní venkovskou a pozadřovou stanici. Reprezentativnost lokality je v rámci oblastního měřítka 4 – 50 km (Fory et al., 2009).

Jedním z hlavních cílů měření MS je stanovit celkovou hladinu pozadí imisních koncentrací a kvality ovzduší v oblasti NP a CHKO Šumava.



Obr. 2 Meteorologická stanice Churáňov (Tolasz, 2009)

Měřicí kontejner je postaven asi 20 m severovýchodně od budovy. V blízkosti stanice se nachází trvalý travní porost.

MS Churáňov je součástí mezinárodní spolupráce v oblasti životního prostředí v rámci mezinárodní sítě sledování kvality ovzduší EUROAIRNET. Tato síť byla založena v roce 1996, součástí sítě se staly již existující stanice v rámci celé Evropy. Jedním z hlavních cílů sítě je umožnit státům objektivní, spolehlivé a srovnatelné informace, které umožní přijmout opatření pro ochranu životního prostředí, vyhodnotit výsledky těchto opatření a zajistit informovanost veřejnosti.



Obr. 3 Meteorologická stanice Churáňov, upraveno (Internet 1)

MS Churáňov je jedinou profesionální synoptickou pozorovatelnu ČHMÚ na území NP a CHKO Šumava

2.2. Získaná data

Použitá data pro zpracování diplomové práce byla poskytnuta z ČHMÚ – Úsek ochrany čistoty ovzduší. Jedná se o denní koncentrace přízemního ozonu, NO_2 , NO_x za období 1995 – 2009 a denní meteorologická data (průměrná rychlost větru, relativní vlhkost vzduchu, GLRD, úhrn srážek, průměrná teplota vzduchu a maximální teplota vzduchu) za období let 2000 – 2009, které jsou zobrazeny v tab. 4 s příslušnými přístroji, kterými se zjišťují meteorologické jevy. Použité proměnné byly vybrány s ohledem na vznik přízemního ozonu.

Pro zjištění roční variability přízemního ozonu byl rok rozdělen na dvě období. Teplé období (duben – září) a studené období roku, kam byly zařazeny zbývající měsíce (říjen – březen).

Data byla zpracována v programu Microsoft Office Excel 2007 a v statistickém programu R ve verzi 2.15.0.

Tab. 4 Meteorologické jevy sledované na stanici Churáňov

Proměnná	Přístroj	Výrobce
GLRD	Pyranometr CMP 11	Kipp-Zonen
Teplota vzduchu	Odporový snímač Pt 100	Vaisala
Úhrn srážek	Váhový srážkoměr MRW 500	Meteoservis Vodňany
Rychlost větru	Ultrasonický snímač WS 425	Vaisala
Relativní vlhkost vzduchu	Kapacitní čidlo HMP 45D	Vaisala

2.3. Použité metody

2.3.1. Korelace

K vyjádření závislosti přízemního ozonu na meteorologických prvcích a znečišťujících látkách byl použit Spearmanův korelační koeficient (Zvára, 2003), neboť tento typ korelace je vhodný pro data, u kterých nebylo prokázáno normální rozdělení. Pomocí Shapiro - Wilkovo testu (Shapiro, Wilk, 1965) byla zamítnuta na 5%-ní hladině významnosti u všech testovaných proměnných normalita dat.

Spearmanův korelační koeficient se vypočte podle vzorce (7):

$$r_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (R_i - Q_i)^2, \quad (7)$$

kde

R_i ... pořadí první náhodné veličiny

Q_i ... pořadí druhé náhodné veličiny

n ... počet pozorování

2.3.2. Vícenásobná lineární regrese

Pro zjištění závislosti koncentrací přízemního ozonu na vybraných meteorologických prvcích a prekurzorech byla zvolena vícenásobná lineární regrese (8), která pomůže určit vliv nezávislých proměnných (meteorologických prvků a prekurzorů) na závisle proměnnou (přízemní ozon).

Z meteorologických jevů byly vybrány pro analýzu tyto proměnné - GLRD, úhrn srážek, relativní vlhkost vzduchu, průměrná a maximální teplota vzduchu. Z prekurzorů ozonu se jedná o NO_2 a NO_x .

U proměnných maximální teplota vzduchu a průměrná teplota vzduchu byla zjištěna silná závislost, Spearmanův korelační koeficient je 0,98 (tab. 10). Stejný problém byl zjištěn mezi proměnnými NO_2 a NO_x , Spearmanův korelační koeficient 0,92. Pro možné problémy při odhadu modelu vícenásobné lineární regrese byla použita pouze jedna proměnná z dvojice, kde byla zjištěna silná závislost.

Do modelu vícenásobné lineární regrese byla vybrána proměnná NO_x , protože byla zjištěna vyšší korelace k přízemnímu ozonu než u proměnné NO_2 (tab. 10). I přes vyšší Spearmanův koeficient korelace u maximální teploty vzduchu, byla vybrána průměrná teplota vzduchu do konečného modelu vícenásobné lineární regrese, protože s touto proměnnou bylo prokázáno vyšší procento vysvětlení variability přízemního ozonu než s maximální teplotou ve výsledném modelu vícenásobné lineární regrese.

Mnohonásobná lineární regrese se řídí modelem (Meloun, Militký, 2002) (8):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \beta_2 x_{i,2} + \dots + \beta_m x_{i,m} + \varepsilon, \quad (8)$$

kde

yzávisle proměnná

$x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}$ nezávisle proměnné

β_1, \dots, β_m ...neznámé regresní parametry

ε hodnota náhodné složky

Pro testování rozptylu výsledného modelu vícenásobné lineární regrese byl zvolen Breusch – Paganův test (Breusch, Pagan, 1979).

2.3.3. Transformace dat u proměnné přízemní ozon

Předpokladem použití lineární regrese je normalita náhodné složky ε . Pokud je tento předpoklad porušen, bývá tak zpravidla z důvodu, že není normálně rozdělena závisle proměnná. V tomto případě je normalita závisle proměnné – přízemního ozonu porušena (p – hodnota Shapiro-Wilkova testu $< 2,2e^{-16}$), a to z důvodu sešikmení dat (šikmost vychází 0,7) zobrazené na obr. 4, což může v důsledku vézt na chybné odhady regresního modelu. Z toho důvodu byla nejprve proměnná přízemní ozon transformována pomocí Box - Coxovy transformace, která data přiblížila k normálnímu rozdělení.

Obecný vzorec mocninné Box - Coxovy transformace (Meloun, Militký, 1994):

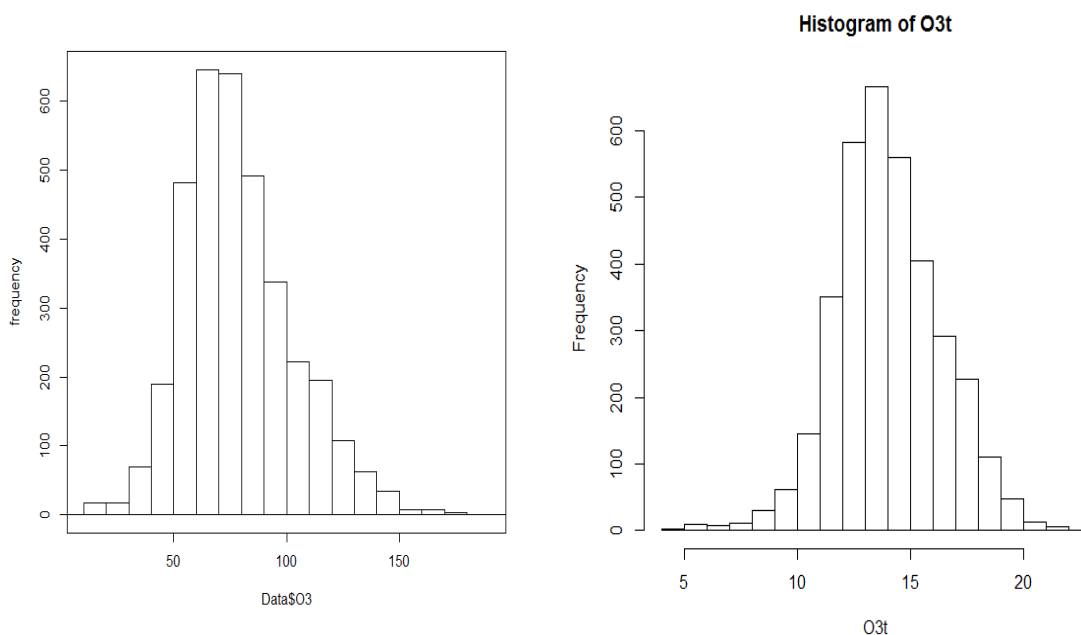
$$y = \begin{cases} (x^\lambda - 1) / \lambda & (\lambda \neq 0) \\ \ln x & (\lambda = 0) \end{cases}, \quad (9)$$

kde

x ... původní proměnná

λ ... transformační konstanta

V tomto případě vyšla výsledná transformační konstanta $\lambda = 0,4646465$.



Obr. 4 Histogram proměnné přízemní ozon (vlevo), histogram proměnné přízemní ozon po Box – Coxově transformaci (vpravo)

2.3.4. Mann – Kendallův test

Pro odhad monotónního trendu koncentrací přízemního ozonu v časové řadě byl použit Mann – Kendallův test (10) a (11). Jedná se o neparametrický test, který je vhodný pro data, která nevykazují normální rozdělení. Jedná se o robustní test, který je málo ovlivněn chybějícími nebo extrémními hodnotami. Zvolený test je doporučován Světovou meteorologickou organizací (WMO) pro odhad trendu v časové řadě.

Mann – Kendallův test se řídí následujícím vzorcem (Sicard et al., 2009):

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{když } S > 0 \\ Z &= 0 & \text{když } S = 0, \\ Z &= \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{když } S < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Rozptyl statistiky S se vypočte dle vzorce (11):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18}, \quad (11)$$

kde

n ... celkový počet hodnot

q ... počet různých hodnot

t_p ... počet stejných hodnot

2.4. Expoziční index AOT 40F

Odhad potenciálního rizika pro lesní porosty působením přízemního ozonu je založen na kumulované vnější expozici ozonem.

AOT40F se spočte jako suma diferencí mezi průměrnou hodinovou koncentrací přízemního ozonu a prahovou hodnotou 40 ppb (= 80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ při standardních atmosférických podmínkách 293,15 K a 1013,25 hPa) pro každou hodinu, kdy byla překročena tato prahová hodnota, během denního světla (globální radiace

přesahující 50 W.m^{-2}) za celé vegetační období (od 1. dubna do 30. září) v případě ochrany lesů.

Pro výpočet expozičního indexu AOT40F pro lesy se používá následující vztah (Werner, Spranger, 1996):

$$AOT40F = \sum_{i \in V} \sum_{j=1}^n \sum_{k \in D} (c_{ijk} - p), \quad (12)$$

kde

c_{ijk} koncentrace 40 ppb přízemního ozonu naměřená v i-tém měsíci, j-tém dni a k-té hodině

p prahová hodnota 40 ppb

D množina hodin s denním světlem, které jsou definovány jako ty hodiny, ve kterých je střední globální záření větší nebo rovno hodnotě 50 W.m^{-2}

V množina měsíců vegetační sezóny

n počet dnů v roce

Pro zjednodušení výpočtu AOT 40F, namísto započítávání zvýšených koncentrací ozonu pouze pro hodiny s denním světlem, kdy globální záření je větší nebo rovno 50 W.m^{-2} , se počítá za fixní časovou periodu 8:00 – 20:00 SEČ, tedy 7:00–19:00 UTC.

Kritická hodnota pro ochranu lesů AOT 40F pro vegetační období byla stanovena na 5 ppm.h ($= 10\,000 \text{ µg.m}^{-3}.\text{h}^{-1}$ při standardních atmosférických podmínkách 293,15 K a 1013,25 hPa), která byla snížena z 10 ppm.h (EC, 2002).

2.5. Víkendový efekt přízemního ozonu

Poskytnutá data denních koncentrací přízemního ozonu byla rozdělena na dvě období roku, a to na teplé období (duben až září) a studené období (říjen až březen).

Dalším postupem bylo rozklasifikovat jednotlivé koncentrace dle toho, kdy byly naměřeny (pracovní den, víkend, sobota a neděle) a k nim byly spočteny příslušné aritmetické průměry koncentrací přízemního ozonu. Klíčem k rozdělení dat bylo přiřazení ke každé koncentraci hodnotu od 1 až do 7, kde tato čísla ukazovala den, kdy byly koncentrace zjištěny (1 – pondělí, 2 – úterý, 3 – středa, 4 – čtvrtek, 5 – pátek, 6 – sobota, 7 – neděle).

Za víkendový efekt přízemního ozonu je považováno zvýšení koncentrací

přízemního ozonu během dní pracovního klidu nad dlouhodobou průměrnou koncentrací přízemního ozonu. Průměrná dlouhodobá koncentrace byla určena tak, že byl vypočítán průměr koncentrací všech dní bez rozdílu toho, kdy byly koncentrace zjištěny za celé sledované období.

Zkoumané období (1995 – 2009) pro výskyt víkendového efektu přízemního ozonu bylo zjišťováno od začátku měření koncentrací přízemního ozonu na stanici Churáňov.

Pro statistické potvrzení víkendového efektu přízemního ozonu byl zvolen dvouvýběrový Wilcoxonův test (9). Jedná se o neparametrický test, neboť nebyl splněn předpoklad normálního rozdělení dat.

Wilcoxonův test se vypočte dle následujícího vzorce (Zvára, 2003):

$$Z = \frac{W_x - n_x(n_x + n_y + 1)/2}{\sqrt{n_x n_y (n_x + n_y + 1)/12}}, \quad (9)$$

kde

W_x ...součet pořadí hodnot

n_x ... pořadí první náhodné veličiny

n_y ... pořadí druhé náhodné veličiny

3. Výsledky

3.1. Roční chod koncentrací přízemního ozonu

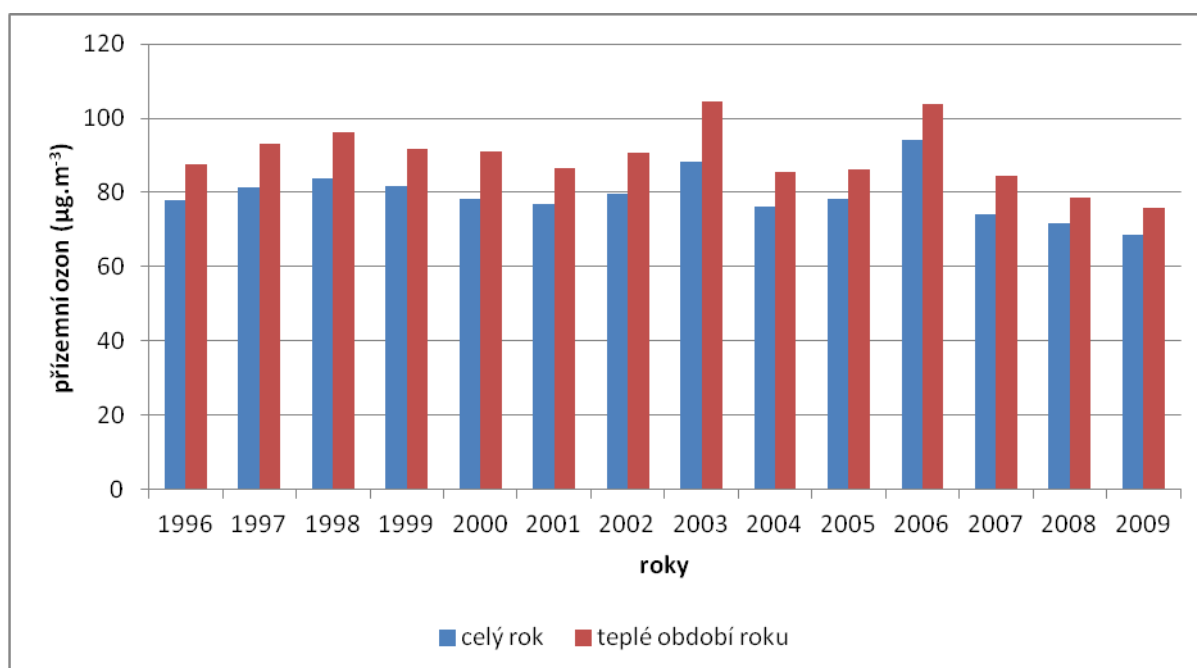
Na obr. 5 jsou zobrazeny roční koncentrace přízemního ozonu v období let 1995 – 2009. Po mírném vzrůstu koncentrací přízemního ozonu v období 1996 – 1998 dochází k poklesu do roku 2001. V roce 2003 je zaznamenán výrazný nárůst koncentrací. Po následném poklesu v letech 2004 a 2005 byl v roce 2006 zjištěn opětovný významný nárůst. Od roku 2007 do roku 2009 docházelo k pozvolnému poklesu koncentrací přízemního ozonu.

Z obr. 5 vyplývá, že nejvyšší roční koncentrace byly zjištěny v letech 2006 ($94,3 \mu\text{g.m}^{-3}$) a 2003 ($88,3 \mu\text{g.m}^{-3}$), naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny v roce 2009

(68,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$).

Průměrná roční koncentrace za celé období 1996 – 2009 byla 79,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Obr. 5 prezentuje naměřené roční koncentrace během měsíců duben až září (teplé období), které jsou vždy vyšší v celém sledovaném období než roční koncentrace.

Během sledovaného období byla průměrná koncentrace přízemního ozonu během teplého období vyšší o 10,3 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Nejvyšší průměrný rozdíl v koncentracích přízemního ozonu byl nalezen ve srovnání období duben až červen (95,7 $\mu\text{g.m}^{-3}$) oproti ročním průměrům. Za toto období byl rozdíl oproti ročnímu průměru o 16,3 $\mu\text{g.m}^{-3}$ vyšší. V druhé části teplého období (červenec – srpen) činila průměrná koncentrace 83,8 $\mu\text{g.m}^{-3}$, zvýšení o 4,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$ oproti ročnímu průměru. Průměrná měsíční koncentrace přízemního ozonu během studeného období byla 69,1 $\mu\text{g.m}^{-3}$.



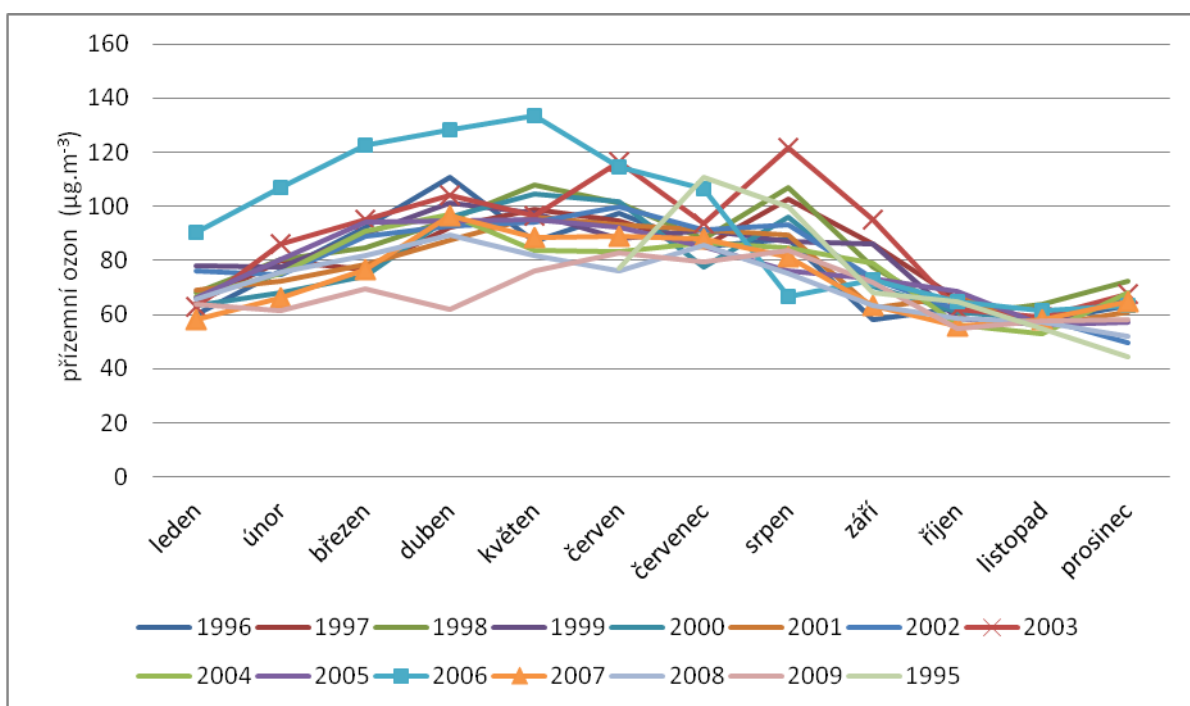
Obr. 5 Roční koncentrace přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Na obr. 8 jsou znázorněny průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu za celé studované období. Z výsledků je patrný trend chodu přízemního ozonu během roku. Pozvolný nástup vyšších hodnot přízemního ozonu v jarních měsících k maximům v teplé polovině roku a poté pokles koncentrací k minimálním hodnotám v podzimních a zimních

měsících.

Z obr. 6 jsou patrné roky, které mají poněkud odlišný trend oproti jiným létům. Jedná se zejména o rok 2006, díky svým vysokým koncentracím a také tím, že vysoké koncentrace přízemního ozonu byly měřeny již začátkem roku. Během roku 2006 bylo zjištěno u pěti měsíců (leden – květen) nejvyšší průměrná měsíční koncentrace za sledované období 1995 – 2009. V tomto roce byla zjištěna i nejvyšší průměrná měsíční koncentrace za sledované období, jednalo se o měsíc květen ($133,7 \mu\text{g.m}^{-3}$). Dalším rokem, který je patrný svým průběhem při pohledu na obr. 6, je rok 2003.

Poněkud odlišný chod koncentrací je vidět u roku 2009, kdy naměřené koncentrace přízemního ozonu v měsíci dubnu byly nejnižší za celé sledované období, i přesto že v tomto měsíci bývají sledovány jedny z maximálních měsíčních koncentrací. Nízké koncentrace byly sledovány i v průběhu letních měsíců.



Obr. 6 Roční chod přízemního ozonu na stanici Churáňově v období 1995-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

3.2. Charakteristika vybraných meteorologických jevů

Tab. 5 prezentuje průměrnou teplotu vzduchu na stanici Churáňov za období 2000-2009, tab.6 průměrný srážkový úhrn na stanici Churáňov za období 2000 - 2009, tab.7 průměrnou relativní vlhkost na stanici Churáňov za období 2000 – 2009 a tab. 8 průměrné hodnoty GLRD na stanici Churáňov za období 2000-2009.

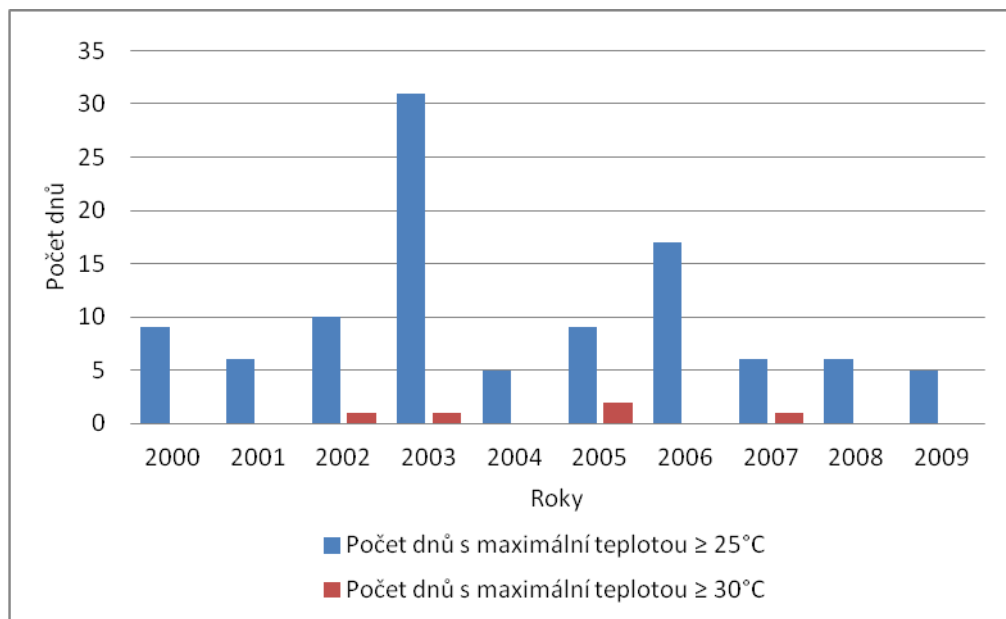
Počty tropických dnů, tj. dny s maximální teplotou 30 °C a více, a počty dnů s letní teplotou (25 °C a více) shrnuje obr. 7. Dny s teplotou vyšší nebo rovnu 25 °C se vyskytují každoročně na stanici Churáňov v celém sledovaném období. Nejvyšší počet letních dnů byl zaznamenán v letech 2003 (31 dnů) a 2006 (17 dnů).

Tropické dny jsou na MS Churáňov měřeny zřídka. Za studované období byla teplota vyšší než 30 °C zjištěna ve čtyřech letech. V letech 2002, 2003 a 2007 byl tropický den zaznamenán jedenkrát za celý rok, v roce 2005 dvakrát.

Nejvyšší naměřená teplota za sledované období činila 31,3 °C, která se vyskytla 29. 7. 2005.

Tab. 5 Průměrná teplota na stanici Churáňov v období 2000-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Charakteristika	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	rok
Průměrná měsíční a roční teplota (°C)													
Normál 1961-1990	-4,1	-3,8	-1,1	2,9	7,8	11,1	12,9	12,4	9,5	5,4	0,1	-3,1	4,2
2000	-4,5	-1,4	-0,5	6,6	10,8	13,8	10,9	14,8	9,8	7,9	3,0	0,0	5,9
2001	-3,0	-1,8	0,8	2,4	10,9	10,2	14,0	14,7	6,9	9,4	-1,4	-5,8	4,8
2002	-2,3	0,2	1,0	3,2	11,2	14,3	14,0	14,4	7,8	3,9	2,6	-2,6	5,7
2003	-4,8	-5,8	0,9	3,4	11,1	16,1	14,8	17,6	10,4	1,5	3,1	-1,5	5,6
2004	-5,7	-2,7	-1,1	4,7	7,1	11,1	13,0	14,3	9,7	6,7	-0,1	-1,2	4,7
2005	-3,5	-6,4	-1,7	4,9	9,3	12,6	13,7	11,7	10,5	7,4	-0,4	-4,5	4,5
2006	-4,5	-4,6	-2,7	3,7	8,7	13,3	17,5	10,6	12,6	9,0	3,5	1,0	5,7
2007	-0,6	0,1	1,4	7,6	10,1	13,5	13,4	13,2	7,5	4,1	-1,1	-2,0	5,6
2008	-0,6	-0,2	-0,9	3,7	10,1	13,2	13,7	13,1	8,1	6,0	2,0	-2,4	5,5
2009	-4,2	-3,7	-0,8	8,9	9,5	10,8	13,9	14,8	11,1	4,3	4,1	-3,0	5,5
Průměr 2000-2009	-3,4	-2,6	-0,4	4,9	9,9	12,9	13,9	13,9	9,4	6,0	1,5	-2,2	5,4
Základní statistické charakteristiky													
Směrodatná odchylka	1,67	2,31	1,27	2,02	1,21	1,70	1,56	1,81	1,72	2,39	1,95	1,90	0,47
Špičatost	-0,68	-1,34	-0,86	-0,34	1,13	-0,11	3,39	0,92	-0,84	-0,71	-1,75	0,19	-0,78
Šikmost	0,65	-0,33	-0,28	0,88	-1,12	0,09	0,64	0,05	0,17	-0,33	-0,33	-0,25	-0,88



Obr. 7 Četnost dnů s letními a tropickými teplotami na stanici Churáňov v období 2000-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Tab. 6 Průměrný srážkový úhrn na stanici Churáňov v období 2000-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Charakteristika	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	rok
Průměrný měsíční a roční srážkový úhrn (mm)													
Normál 1961-1990	78,7	67,2	80	86	103,4	127,5	114	115,6	77,3	62,2	83,5	95,3	1090,7
2000	73,4	89,2	192,8	30,8	109,2	89,2	125	62,9	66,4	84,2	35,5	56,3	1014,9
2001	50,1	66,2	136,8	110,9	83,8	120,1	84	118	96,1	37,4	113,2	165	1181,6
2002	62,2	181,4	145,8	56,9	47,1	107,7	94,5	383,3	131	172,5	83,3	83,4	1549,1
2003	163,2	46,9	32,9	52,4	107,6	55,8	116,9	51,4	18,9	130	19,8	95,8	891,6
2004	144,7	109,5	111,8	71,4	108,3	142,2	83,5	59	84,5	58,5	125,1	38,6	1137,1
2005	115,5	149	74,8	77,5	84,9	94,6	201	213,2	111,8	31,6	58,8	77,7	1290,4
2006	94,1	99,4	117,6	121	114,7	135,7	103,9	210,9	27,7	29,7	66,5	51	1172,2
2007	185,2	69,2	123	9,4	119,6	63,7	137,3	71,2	168,1	76,9	151,1	98,5	1273,2
2008	41,9	77,8	140,3	109,6	60,1	76,9	127,3	103,9	100,8	46,5	65,3	54,4	1004,8
2009	27,8	113,4	135	56,7	183,1	243,2	202	81,9	48	114,6	55,2	83,4	1344,3
Průměr 2000-2009	95,8	100,2	121,1	69,7	101,8	112,9	127,5	135,6	85,3	78,2	77,4	80,4	1186
Základní statistické charakteristiky													
Směrodatná odchylka	51,54	38,49	40,72	34,30	35,45	51,29	40,79	99,82	44,14	45,30	38,99	34,1	180,77
Špičatost	-1,00	0,80	0,59	-0,67	-0,06	-1,33	3,56	2,75	0,06	1,30	-0,39	2,47	1,30
Šikmost	0,58	1,16	-0,26	-0,34	-1,03	-0,16	1,60	1,66	0,05	1,35	0,33	1,30	0,80

Tab. 7 Průměrná relativní vlhkost vzduchu na stanici Churáňov v období 2000-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Charakteristika	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	rok
Průměrná měsíční a roční relativní vlhkost vzduchu (%)													
2000	91	90	94	77	74	69	86	75	88	86	83	80	83
2001	86	79	90	83	74	79	76	78	91	81	91	91	83
2002	82	87	76	76	75	71	80	85	88	92	87	96	83
2003	93	79	75	71	77	69	71	59	73	88	81	79	76
2004	93	87	82	80	78	78	81	76	79	86	92	73	82
2005	85	89	80	74	74	73	79	85	86	83	91	95	83
2006	82	85	88	79	74	74	72	87	82	79	82	84	81
2007	94	91	86	64	76	79	78	81	90	92	93	85	84
2008	87	77	86	86	76	80	81	83	88	87	89	93	84
2009	80	94	94	70	83	83	83	81	89	93	86	93	86
Základní statistické charakteristiky													
Směrodatná odchylka	4,85	5,41	6,44	6,22	2,83	4,73	4,26	7,63	5,37	4,42	4,06	7,39	2,44
Špičatost	-1,73	-1,12	-1,09	-0,18	4,52	-1,38	-0,20	4,06	1,25	-0,92	-1,62	-1,17	3,63
Šikmost	0,00	-0,40	-0,19	-0,24	1,97	0,05	-0,43	-1,82	-1,38	-0,33	-0,24	-0,42	-1,59

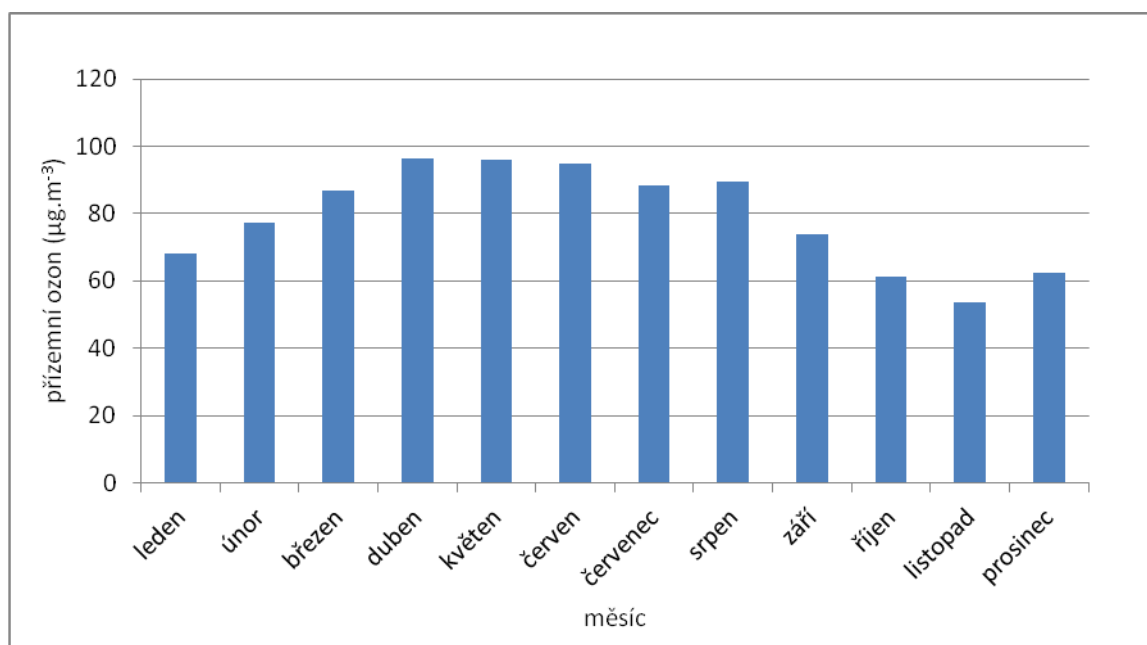
Tab. 8 Průměrné hodnoty GLRD na stanici Churáňov v období 2000-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Charakteristika	leden	únor	březen	duben	květen	červen	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec	rok
Průměrná měsíční a roční hodnoty GLRD (kW.m-2)													
2001	3,6	6,4	8,1	13,0	19,0	17,7	18,5	16,7	8,1	9,1	3,9	2,7	123,2
2002	4,5	5,0	11,0	14,0	16,5	21,8	17,2	14,2	10,4	5,5	3,6	2,2	121,3
2003	2,9	8,4	11,5	16,5	18,5	21,7	19,6	19,9	13,8	6,4	4,8	3,4	144,2
2004	3,2	5,0	10,0	7,3	16,0	17,2	17,1	17,0	12,6	7,1	2,9	3,8	116,1
2005	3,2	5,3	11,7	14,0	18,4	20,3	17,0	13,0	12,7	9,4	4,1	2,4	128,2
2006	4,6	6,1	8,9	12,7	18,7	19,3	20,0	3,5	5,6	8,2	15,2	18,8	22,3
2007	2,6	7,6	9,6	12,3	18,3	19,8	19,3	15,5	9,8	6,9	3,4	3,2	132,8
2008	3,5	7,6	9,6	12,3	18,1	18,0	17,9	16,3	9,5	8,0	4,6	2,9	128,1
2009	4,1	5,1	8,4	18,8	16,9	17,0	16,8	17,7	11,4	6,8	4,4	2,7	132,0
Základní statistické charakteristiky													
Směrodatná odchylka	0,64	1,18	1,28	3,39	1,08	1,92	1,77	2,03	2,05	1,19	0,56	0,50	7,10
Špičatost	-0,73	-1,03	-1,35	1,87	-0,61	-1,64	0,80	-0,28	-0,35	-0,96	-0,17	-1,11	1,26
Šikmost	0,36	0,71	0,34	-0,44	-0,97	0,13	0,33	0,05	0,23	0,28	-0,71	-0,06	0,44

3.3. Průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu

Na obr. 8 jsou zobrazeny průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu v období 1996 - 2009. Je patrné, že nejvyšší hodnoty přízemního ozonu jsou zjišťovány v měsíci dubnu s průměrnou měsíční koncentrací $96,2 \mu\text{g.m}^{-3}$. Následuje měsíc květen s téměř shodnou koncentrací ($95,8 \mu\text{g.m}^{-3}$) a červen ($95 \mu\text{g.m}^{-3}$). Po mírném snížení koncentrací v červenci dochází k opětovnému nárůstu v srpnu ($89,4 \mu\text{g.m}^{-3}$).

Nejnižší průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu byly zjištěny v měsíci listopadu ($53,7 \mu\text{g.m}^{-3}$). Poté dochází k pozvolnému nárůstu koncentrací během zimních a jarních měsíců.

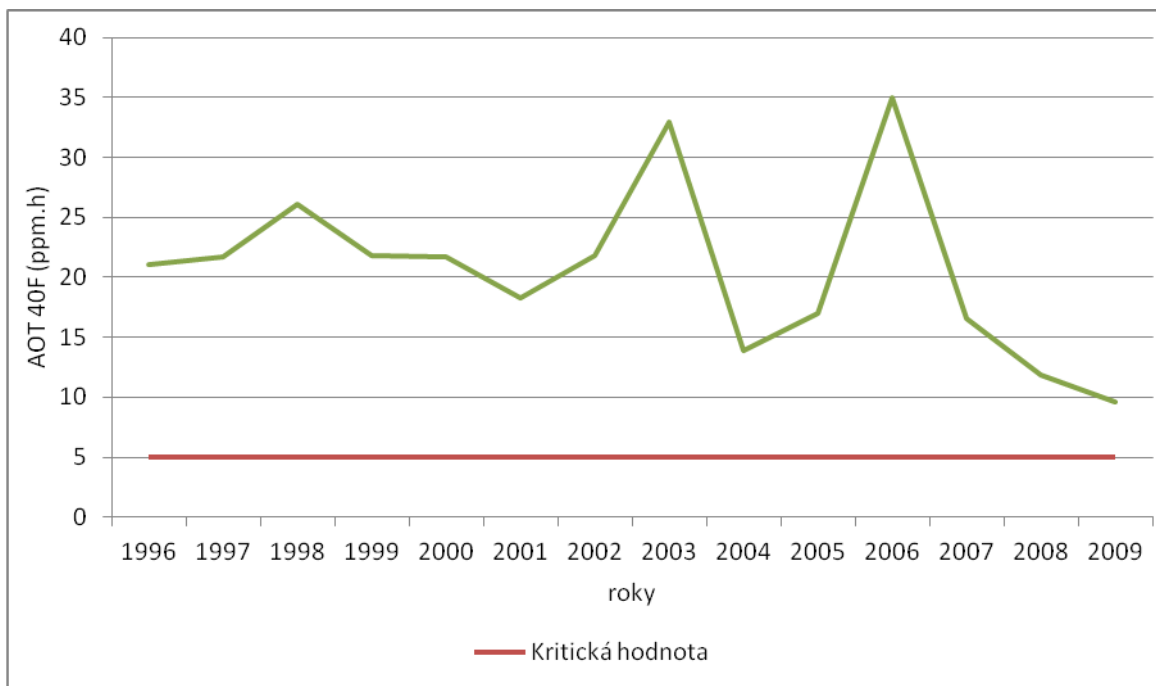


Obr. 8 Průměrné měsíční koncentrace přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

3.4. AOT 40F

Z hodnot expozičního indexu AOT 40 pro lesy (obr. 9) je patrná výrazná meziroční variabilita. Maximální hodnoty expozičního indexu za sledované období byly zjištěny v letech 2003 ($32,9 \text{ ppm.h}$) a 2006 ($34,9 \text{ ppm.h}$).

Kritická hodnota pro ochranu lesů 5 ppm.h byla překračována každý rok několikanásobně. Nejvyšší překročení (6,9krát) bylo v roce 2006 a v roce 2003 byla kritická hodnota převýšena 6,6krát, nejnižší překročení (1,9krát) bylo zaznamenáno v roce 2009.



Obr. 9 Hodnoty expozičního indexu AOT 40F na stanici Churáňov v období 1996-2009 (zpracováno na základě dat ČHMÚ)

3.5. Dny s koncentrací přízemního ozonu vyšší než $65 \mu\text{g.m}^{-3}$

Tab. 9 prezentuje denní hodnoty přízemního ozonu na stanici Churáňov za období 1995 - 2009, ve které jsou zobrazeny podíly dnů s 24 hodinovou koncentrací vyšší než $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ pro celý rok a zvlášť pro teplé a studené období roku.

Hodnota $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ byla vybrána z toho důvodu, že představuje průměrnou směrnou denní koncentraci na ochranu vegetace vytvořené dle směrnice 92/72/EHS.

Z tab. 9 je patrné, že denní koncentrace vyšší než $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ jsou velmi často překračovány během celého roku. V extrémních případech, jako jsou roky 1997, 1998, 1999, 2003, dochází v teplých obdobích roku překračování koncentrací téměř denně.

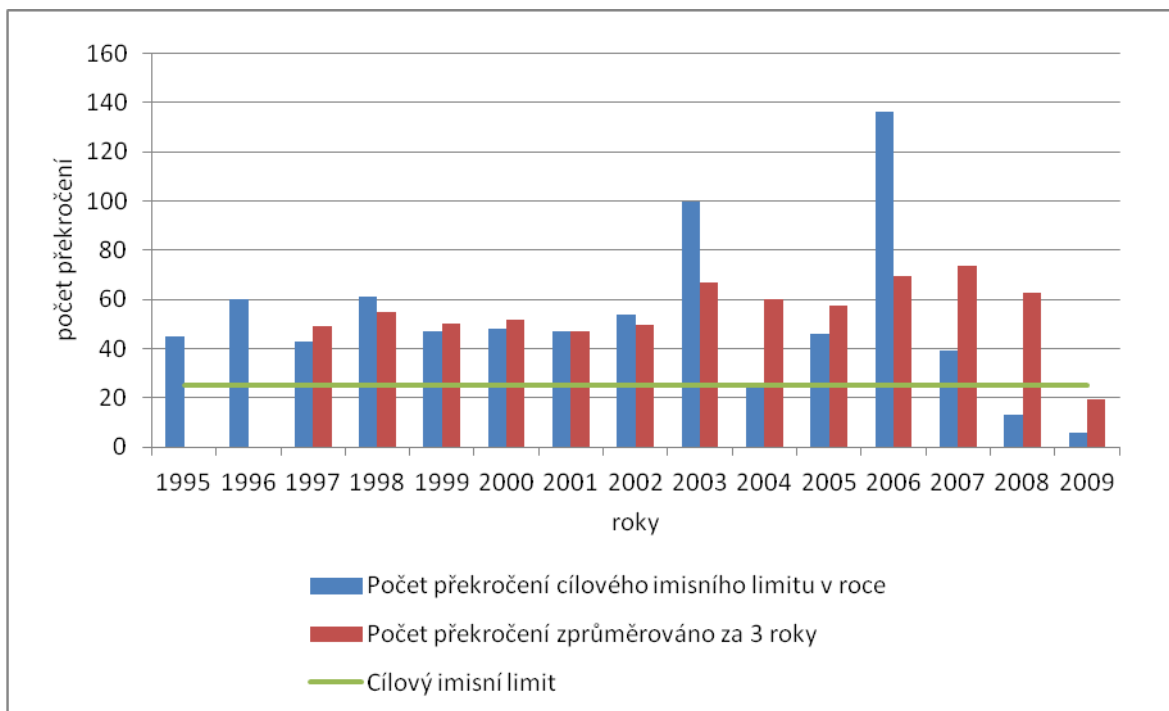
Tab. 9 Podíl dnů s koncentrací přízemního ozonu nad $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

	% dní s koncentrací >65 $\mu\text{g.m}^{-3}$ v roce			roční průměr ($\mu\text{g.m}^{-3}$)
	celý rok	teplé období	studené období	
1996	70	82	58	78,1
1997	79	95	50	81,4
1998	84	96	73	83,8
1999	77	91	62	81,8
2000	69	86	51	78,1
2001	69	82	56	76,9
2002	74	87	61	79,8
2003	78	96	61	88,3
2004	69	86	54	76,3
2005	72	84	60	78,3
2006	77	86	68	94,3
2007	60	77	43	74
2008	64	76	52	71,8
2009	58	72	45	68,5

3.6. Maximální 8hodinové koncentrace přízemního ozonu

Na obr. 10 jsou zobrazeny počty překročení maximálního 8hodinové průměrné koncentrace přízemního ozonu a počet překročení cílového imisního limitu na stanici Churáňov. Je patrné, že překračování koncentrace $120 \mu\text{g.m}^{-3}$ dochází každoročně. Nejméně překročení bylo naměřeno v roce 2009, jednalo se o 6 překročení a v roce 2008 bylo zaznamenáno 13 překročení. Absolutně nejvíc překročení (136) bylo zjištěno v roce 2006 a 100 překročení v roce 2003. Cílový imisní limit přízemního ozonu na ochranu lidského zdraví byl každoročně překračován v období 1997 – 2008.

Nejvyšší 8hodinový průměr ($199,6 \mu\text{g.m}^{-3}$) byl zjištěn 13. 8. 2003, podobně vysoká koncentrace ($192,4 \mu\text{g.m}^{-3}$) byla měřena 6. 5. 2006.



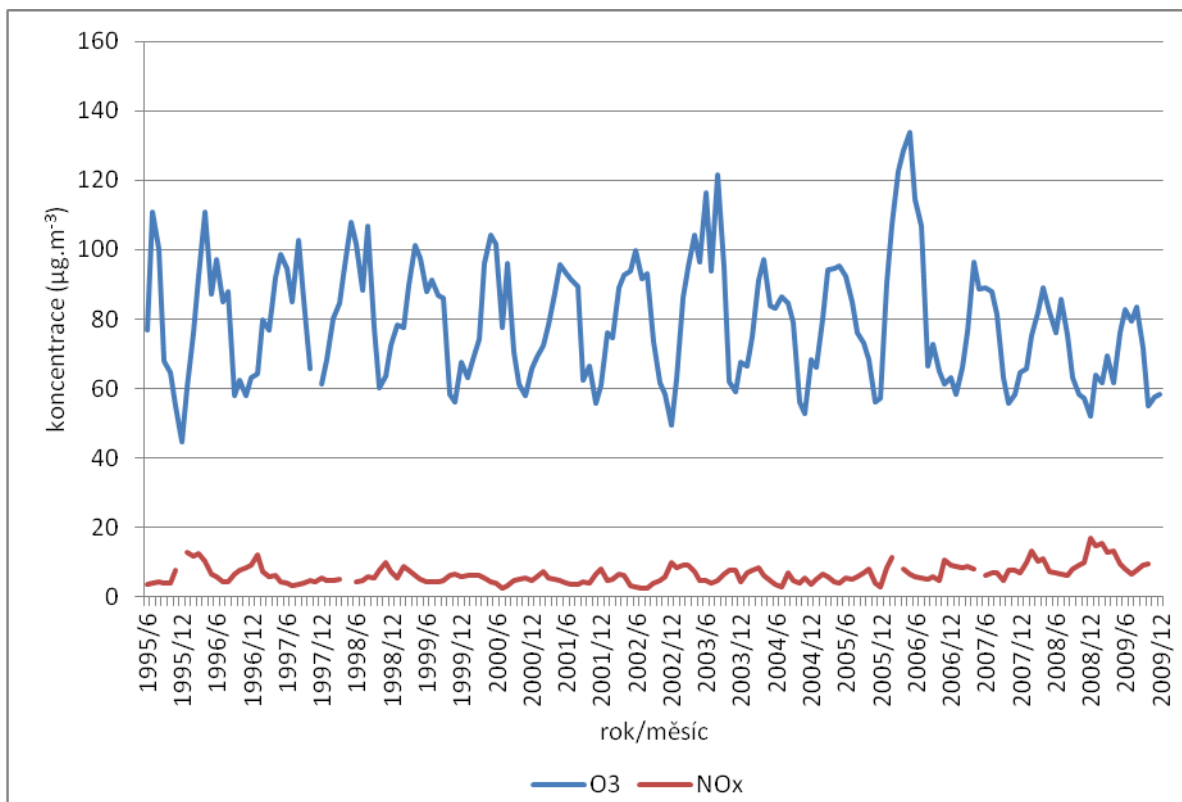
Obr. 10 Počet překročení cílového imisního limitu pro přízemní ozon ($120 \mu\text{g.m}^{-3}$) na stanici Churáňov v období 1995-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

3.7. Srovnání koncentrací přízemního ozonu a NO_x

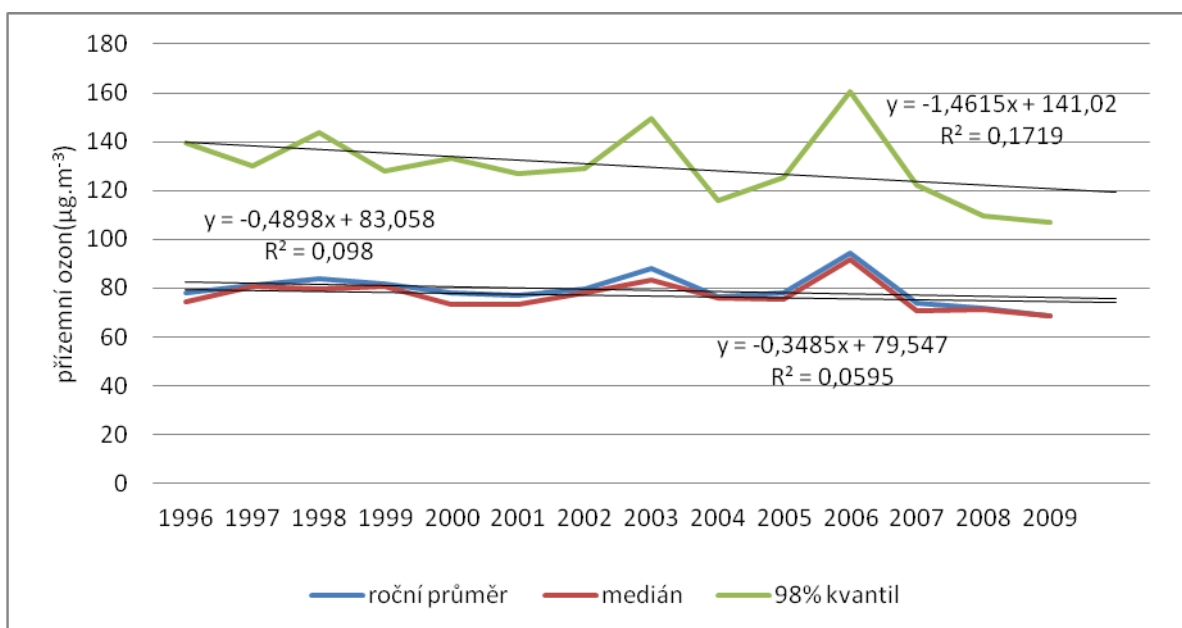
Na obr. 11 jsou zobrazeny měsíční koncentrace přízemního ozonu doplněné o koncentrace NO_x . Hodnoty koncentrací NO_x jsou nízké, protože se v blízkosti MS nenachází významný zdroj emisí oxidů dusíku.

3.8. Mann – Kendallův test

Obr. 12 prezentuje aritmetický průměr ročních koncentrací, medián a 98% kvantil přízemního ozonu (doplněné o spojnicí trendu) za období 1996 – 2009, je patrný klesající trend u 98% kvantilu. Na 5%-ní hladině významnosti pro 98% kvantil přízemního ozonu se prokázala přítomnost trendu s klesajícím trendem ($p = 0,029$). U mediánu se nepotvrdil rostoucí ani klesající trend ($p = 0,189$; $\alpha < 0,05$), rovněž u aritmetického průměru nebyl nalezen trend ($p = 0,1$; $\alpha < 0,05$) během sledovaného období 1996 – 2009.



Obr. 11 Srovnání průměrných měsíčních koncentrací přízemního ozonu a oxidů dusíku na stanici Churáňov v období 1995-2009 (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)



Obr. 12 Roční průměr, medián a 98% kvantil přízemního ozonu na stanici Churáňov v období 1996-2009, doplněn o spojnice trendu (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

3.9. Korelace

V tab. 10 jsou zobrazeny Spearmanovy koeficienty korelace a v tab. 11 k nim příslušná statistická významnost určena pomocí p-hodnot.

Na hladině významnosti $\alpha = 0,01$ byla prokázána závislost mezi přízemním ozonem a všemi sledovanými faktory. Nejvýznamnější korelace přízemního ozonu byla nalezena s GLRD ($r = 0,68$). Významné závislosti k přízemnímu ozonu byly zjištěny s teplotou, maximální teplota vzduchu ($r = 0,49$) a průměrná teplota vzduchu ($r = 0,43$). Dále byla zjištěna záporná korelace ozonu s relativní vlhkostí vzduchu ($r = -0,68$), úhrnem srážek ($r = -0,3$), NO_x ($r = -0,21$), NO_2 ($r = -0,18$) a průměrnou rychlostí větru ($r = -0,18$).

Tab. 10 Výsledné koeficienty Spearmanovy korelace (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

n=3528	GLRD	Teplota_ vzduchu_ max	NO_2	NO_x	O_3	Prům_ rychlost větru	Srážky úhrn	Teplota_ vzduchu_ prům	Rel_ vlhkost_ vzduchu
GLRD		0,77	-0,21	-0,17	0,68	-0,25	-0,41	0,71	-0,74
T_vzduchu max	0,77		-0,36	-0,3	0,49	-0,26	-0,22	0,98	-0,58
NO_2	-0,21	-0,36		0,92	-0,18	0,06	0,04	-0,35	0,2
NO_x	-0,17	-0,3	0,92		-0,21	0,04	0,03	-0,29	0,2
O_3	0,68	0,49	-0,18	-0,21		-0,18	-0,3	0,43	-0,68
Rychl_větru prům	-0,25	-0,26	0,06	0,04	-0,18		0,32	-0,21	0,25
Srážky_úhrn	-0,41	-0,22	0,04	0,03	-0,3	0,32		-0,15	0,56
T_vzduchu prům	0,71	0,98	-0,35	-0,29	0,43	-0,21	-0,15		-0,49
Rel_vlhkost vzduchu	-0,74	-0,58	0,2	0,2	-0,68	0,25	0,56	-0,49	

Tab. 11 Statistická významnost (p – hodnoty) Spearmanovy korelace (zpracováno na základě dat z ČHMÚ)

n=3528	GLRD	Teplota vzduchu _max	NO ₂	Nox	O ₃	Prům_ rychlost_ větru	Srážky úhrn	Teplota_ vzduchu_ prům	Rel_ Vlhkost vzduchu
GLRD		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
T_vzduchu max	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NO ₂	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	0,0008	0,0111	0,0000	0,0000
Nox	0,0000	0,0000	0,0000		0,0000	0,0276	0,0588	0,0000	0,0000
O ₃	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Rychl_ větru_ prům	0,0000	0,0000	0,0008	0,0276	0,0000		0,0000	0,0000	0,0000
Srážky_ úhrn	0,0000	0,0000	0,0111	0,0588	0,0000	0,0000		0,0000	0,0000
T_vzduchu prům	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		0,0000
Rel_vlhkost vzduchu	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

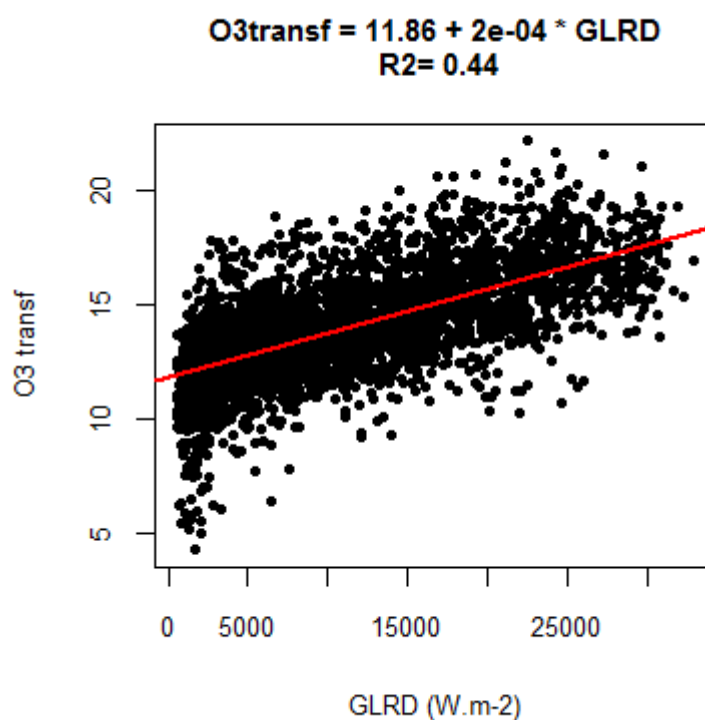
3.10. Regresní analýza

3.10.1. Jednoduchá lineární regrese

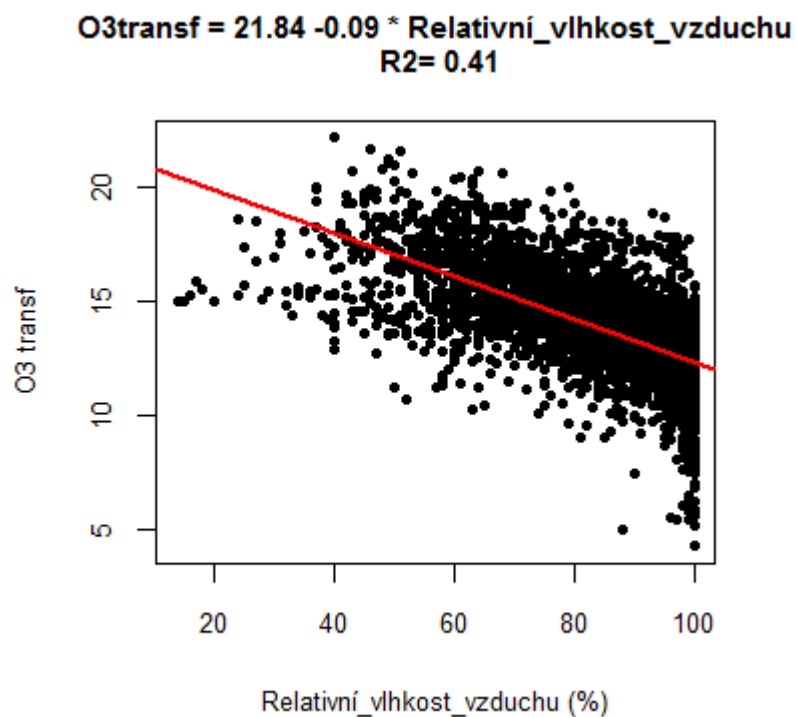
Z výsledků regresní analýzy závislosti transformovaných koncentrací přízemního ozonu za období 1996 - 2009 na globální radiaci (obr. 13) je patrné, že koncentrace přízemního ozonu na GLRD silně pozitivně závisí. Hodnota koeficientu determinace je nejvyšší ($R^2 = 0,46$) ze všech sledovaných proměnných (tab. 12). Další významná závislost ($R^2 = 0,41$) byla zjištěna mezi přízemním ozonem a relativní vlhkostí vzduchu (obr. 14). U proměnné úhrn srážek byla zjištěna nízká závislost k přízemnímu ozonu $R^2 = 0,01$ (obr. 15). Mezi další významné proměnné, které se podílejí na vzniku přízemního ozonu je teplota vzduchu. Zjištěna závislost ($R^2 = 0,19$) mezi přízemním ozonem a průměrnou teplotou prezentuje obr. 16 a maximální teplotou ($R^2 = 0,24$) zobrazuje obr. 17. U prekurzorů přízemního ozonu byla zjištěná nízká závislost u NO₂ ($R^2 = 0,08$) zobrazena na obr. 18 a u NO_x ($R^2 = 0,09$), která je vidět na obr. 19. Rovněž mezi přízemním ozonem a průměrnou rychlostí větru (obr. 20) vyšla velmi malá závislost ($R^2 = 0,03$).

Tab. 12 Výsledky jednoduché lineární regrese přízemního ozonu na vybraných proměnných, doplněné o koeficient determinace (zpracováno na základě dat ČHMÚ)

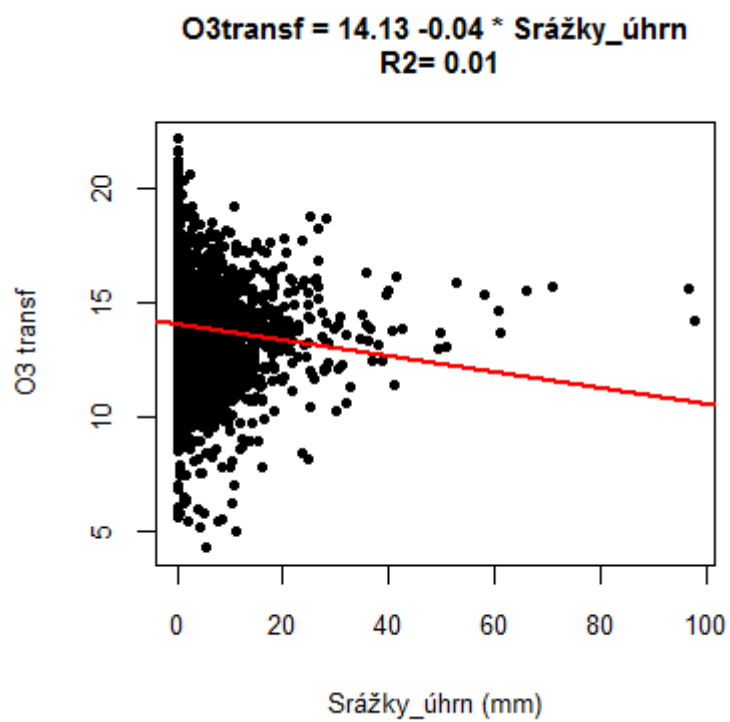
Proměnná	R ²
GLRD_suma	0,43
Relativní_vlhkost_vzduchu	0,40
Teplota_vzduchu_max	0,24
Teplota_vzduchu_prům	0,18
NOx	0,09
NO ₂	0,08
Rychlost_větru_prům	0,02
Srážky_úhrn	0,01



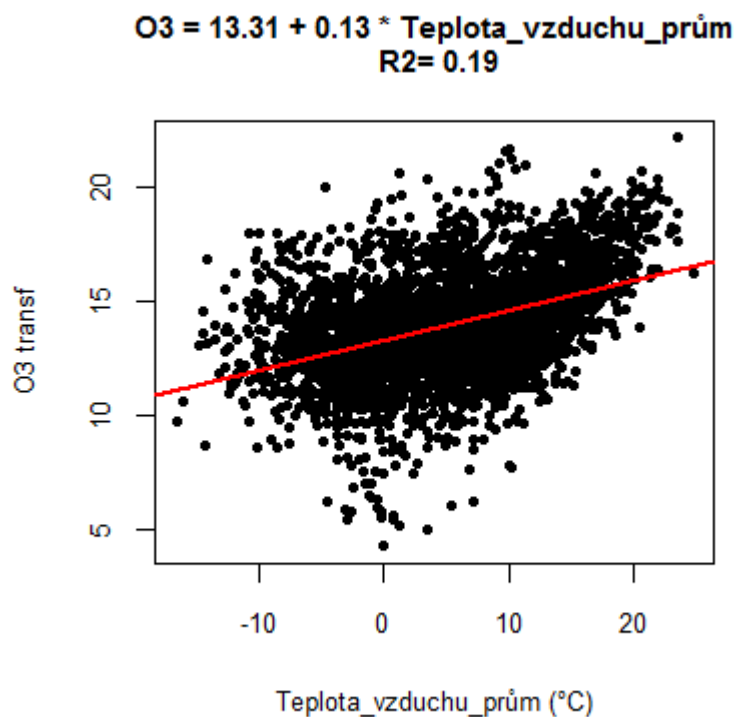
Obr. 13 Regresní závislost přízemního ozonu na GLRD (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



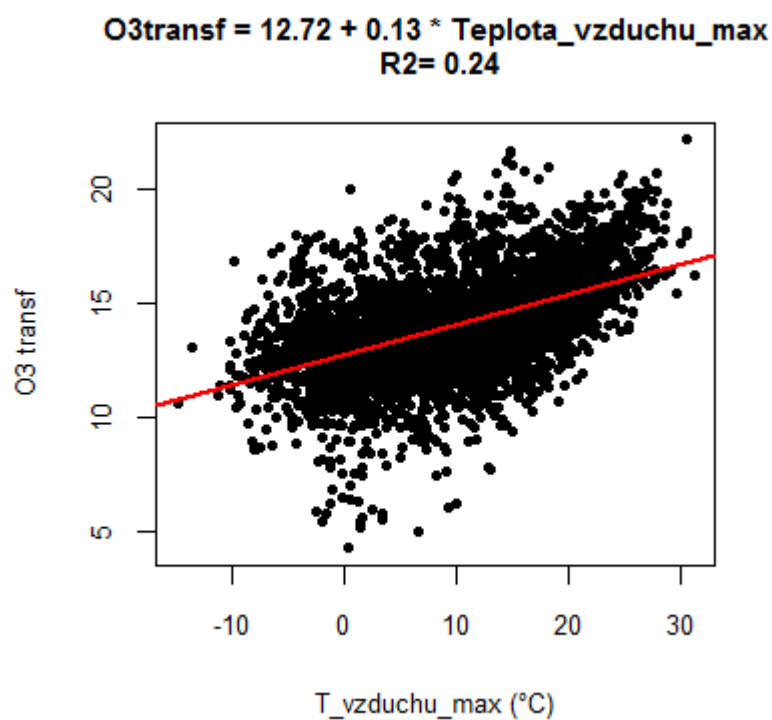
Obr. 14 Regresní závislost přízemního ozonu na relativní vlhkosti vzduchu (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



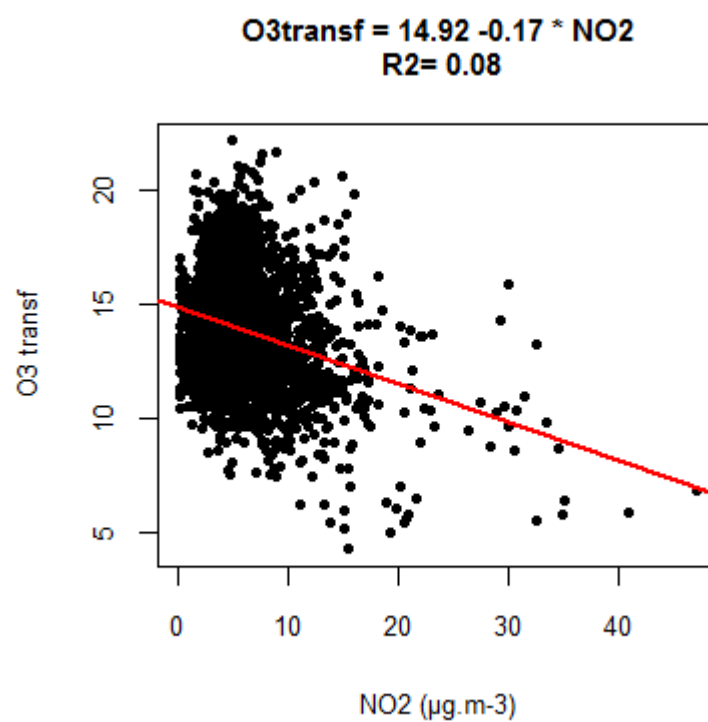
Obr. 15 Regresní závislost přízemního ozonu na srážkovém úhrnu (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



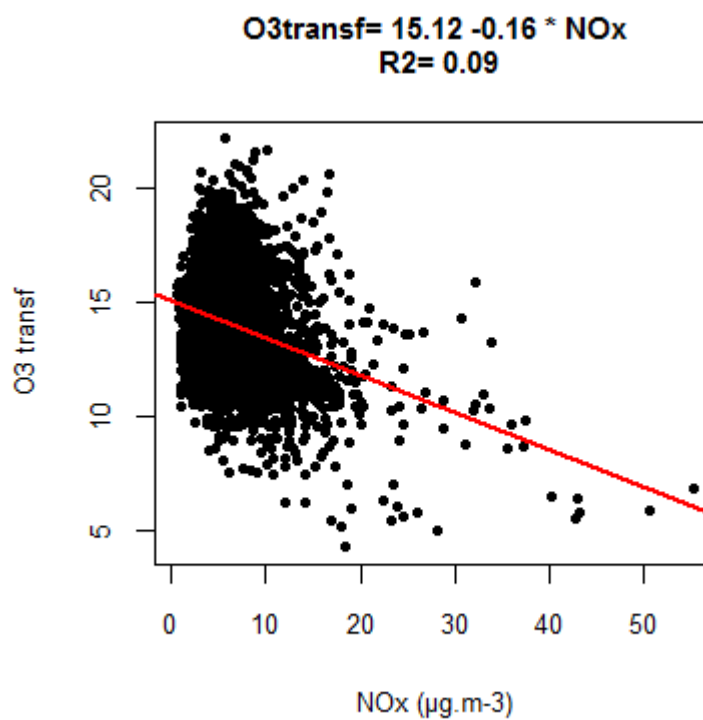
Obr. 16 Regresní závislost přízemního ozonu na průměrné teplotě vzduchu (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



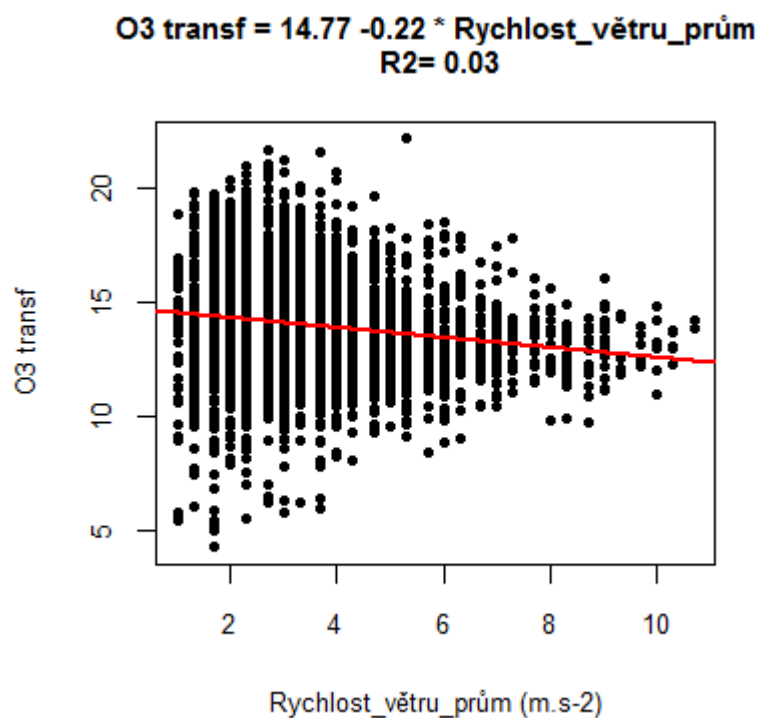
Obr. 17 Regresní závislost přízemního ozonu na maximální teplotě vzduchu (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



Obr. 18 Regresní závislost přízemního ozonu na NO₂ (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



Obr. 19 Regresní závislost přízemního ozonu na NO_x (zpracováno na základě dat ČHMÚ)



Obr. 20 Regresní závislost přízemního ozonu na průměrné rychlosti větru (zpracováno na základě dat ČHMÚ)

3.10.2. Vícenásobná lineární regrese

Výsledky vícenásobné lineární regrese jsou zobrazeny v tab. 13. Do konečného modelu, kde závisle proměnná je transformovaná proměnná přízemní ozon, byly zahrnuty proměnné GLRD, průměrná rychlost větru, úhrn srážek, relativní vlhkost vzduchu, průměrná teplota vzduchu a NO_x .

U výsledného modelu nebylo potvrzeno normální rozdělení na 5%-ní hladině ($p < 2.2e^{-16}$). Pomocí Breusch-Paganova testu byl potvrzen na 5%-ní hladině konstantní rozptyl závisle proměnné v závislosti na všech nezávislých proměnných (tzv. homoskedasticita) ($p = 0,738$).

Přestože nejsou splněny předpoklady použití lineární regrese, je možné získaným výsledkům důvěřovat, jelikož jsou v souladu s analýzami uvedenými výše. Všechny použité proměnné v regresním modelu jsou na 5%-ní hladině signifikantní.

Tab. 13 Výsledné hodnoty vícenásobné lineární regrese (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

Proměnná	Odhad	Střední chyba odhadu	t - kritérium	Spočtená hladina významnosti
Absolutní člen	1,742e ⁺⁰¹	2,292e ⁻⁰¹	76,007	< 2e ⁻¹⁶
GLRD	1,496e ⁻⁰⁴	5,784e ⁻⁰⁶	26,793	< 2e ⁻¹⁶
NO _x	-9,223e ⁻⁰²	6,398e ⁻⁰³	-14,416	< 2e ⁻¹⁶
Rychl_větru_prům	5,179e ⁻⁰²	1,650e ⁻⁰²	3,138	0,00172
Srážky_úhrn	3,817e ⁻⁰²	4,284e ⁻⁰³	8,909	< 2e ⁻¹⁶
Relat_vlhkost_vzd	-5,501e ⁻⁰²	2,293e ⁻⁰³	-23,991	< 2e ⁻¹⁶
T_vzduchu_prům	-3,918e ⁻⁰²	5,022e ⁻⁰³	-7,801	8,04e ⁻¹⁵

Pomocí proměnných (GLRD, relativní vlhkost vzduchu, úhrn srážek, průměrná rychlost větru, průměrná teplota vzduchu a NO_x) bylo vysvětleno 55,4 % variability koncentrací přízemního ozonu v období 2000 – 2009. Hlavní podíl na koncentraci přízemního ozonu mají proměnné GLRD, dále relativní vlhkost vzduchu a NO_x, což je v souladu s výsledky výše.

Výsledný tvar regresní přímky:

$$\frac{O_3^\lambda - 1}{\lambda} = 17,4 + 0,0001\text{GLRD} - 0,092\text{NO}_x + 0,052\text{Rychl_větru_prům} + \\ 0,038\text{Srážky_úhrn} - 0,055\text{Relat_vlhkost_vzd} - 0,039\text{T_vzduchu_prům}$$

Transformační konstanta λ má hodnotu 0,4646465.

3.11. Víkendový efekt přízemního ozonu

Změny v koncentracích přízemního ozonu mezi pracovními dny a víkendovými dny, jsou zobrazeny v tab. 14. Výsledky ukazují, že nebyl potvrzen víkendový efekt přízemního ozonu v teplé části roku, ale pozitivní výsledky ukazují nárůst koncentrací víkendových dnů v chladné části roku nad koncentrace pracovních dnů.

Pomocí neparametrického dvouvýběrového Wilcoxonova testu na 5%-ní hladině

významnosti se prokázal významný rozdíl ($p = 0,0041$) v koncentracích přízemního ozonu mezi pracovními dny, kdy průměrné koncentrace za sledované období činily $67,7 \mu\text{g.m}^{-3}$, a víkendovými dny s průměrnou koncentrací $70,2 \mu\text{g.m}^{-3}$ v chladné části roku. Rovněž se podařilo na 5%-ní hladině významnosti prokázat významný rozdíl ($p = 0,0001$) v koncentracích přízemního ozonu mezi pracovními dny a nedělí, kde průměrná koncentrace za období 1995 – 2009 činila $71,5 \mu\text{g.m}^{-3}$ v chladné části roku.

Tab. 14 Výsledky víkendového efektu přízemního ozonu na stanici Churáňov (zpracováno na základě dat získaných ČHMÚ)

1995-2009	Teplá část roku (1.4. - 30.9)	Chladná část roku (1.10. - 31.3.)
koncentrace přízemního ozonu 1995-2009 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) a	89,58	68,62
víkend (%) b	-0,55	2,15
vk d vs. pd (%) c	-0,98	2,93*
sobota (%) d	-1,15	0,81
neděle (%) d	-0,35	5,03*

a - úroveň koncentrace přízemního ozonu 1995 - 2009

b - %zvýšení průměrné víkendové koncentrace O_3 oproti průměru

c - %zvýšení průměrné víkendové koncentrace O_3 oproti průměru pracovních dnů

d - %zvýšení průměrné sobotní, resp. nedělní koncentrace O_3 oproti průměru pracovních dnů

* - statisticky potvrzený rozdíl v koncentracích přízemního ozonu

4. Diskuze

Přízemní ozon společně s aerosolem PM₁₀, s ohledem na rozsah dopadu a frekvenci, se kterou jsou limitní prahové hodnoty překračovány, označován za nejproblematictější znečišťující látku v ovzduší v České republice tak i v jiných regionech Evropy (EEA, 2009).

Z výsledků dlouhodobého monitoringu (1995 – 2009) přízemního ozonu na meteorologické stanici Churáňov byla zjištěna průměrná roční koncentrace za sledované období 79,4 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Nejvyšší roční koncentrace byly naměřeny v letech 2006 (94,3 $\mu\text{g.m}^{-3}$) a 2003 (88,3 $\mu\text{g.m}^{-3}$), naopak nejnižší hodnoty byly získány v roce 2009 (68,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$). Extrémně vysoké hodnoty koncentrací přízemního ozonu se vyskytly díky příznivým meteorologickým podmínkám pro fotochemický vznik přízemního ozonu - vysoká teplota, vysoká sluneční radiace a nižší výskyt srážek (Finlayson-Pitts, Pitts, 2000). Výrazně vysoké koncentrace přízemního ozonu v roce 2003, kdy v tomto roce byly naměřeny jedny z nejvyšších koncentrací přízemního ozonu nejen na stanici Churáňov, ale vysoké koncentrace, byly zjišťovány v celé Evropě díky příhodným meteorologickým podmínkám pro vznik přízemního ozonu (Solberg et al., 2008; Luterbacher et al., 2004).

Z řady prací (např. Brace, Peterson, 1998; Skelly et al., 2001) je známo, že koncentrace přízemního ozonu rostou s vyšší nadmořskou výškou. Meteorologická stanice Churáňov se nachází v nadmořské výšce 1 118 m n. m., i proto jsou zde zjišťovány vyšší koncentrace přízemního ozonu, neboť je potvrzen růst koncentrací přízemního ozonu s nadmořskou výškou (ČHMÚ, 2009). Výše položené oblasti mají výhodnější podmínky pro fotochemický vznik přízemního ozonu prostřednictvím vyšší solární radiace (Volz, Kley, 1988; Sicard et al., 2009). Získaná hodnota Spearmanova korelačního koeficientu 0,68 mezi GLRD a přízemním ozonem, rovněž i výsledek z jednoduché lineární regrese, kdy bylo vysvětleno 43% variability přízemního ozonu prostřednictvím sluneční radiace, potvrzují tuto informaci. Vysoká hodnota závislosti přízemního ozonu na GLRD odpovídá teorii vzniku přízemního ozonu fotochemickou cestou, kde je zřejmé, že pro vznik ozonu je potřebné sluneční záření. Vyšší nadmořská výška rovněž umožňuje snažší přestup stratosférického ozonu do mezní vrstvy atmosféry (Sánchez et al., 2008). Přestup ozonu ze stratosféry přes tropopauzu do troposféry se odhaduje, že tvoří 10% přízemního ozonu (Fusco, Logan, 2003).

Průměrná měsíční koncentrace přízemní ozonu za vegetační období (duben – září) byla 89,7 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Obdobná hodnota (80 – 100 $\mu\text{g.m}^{-3}$) byla zjištěna i v jiných studiích ve

střední a východní Evropě (Bytnerowicz et al., 2004; Wieser et al., 2001; Wieser et al., 2006). Vyšší průměrné měsíční koncentrace jsou zjištěny v 2. čtvrtletí roku (duben – červen) $95,7 \mu\text{g.m}^{-3}$. Během studeného období roku jsou průměrné měsíční hodnoty $69,1 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Z ročního chodu koncentrací přízemního ozonu v období 1996 – 2009 bylo potvrzené, že nejvyšší průměrné měsíční hodnoty jsou sledovány v jarních měsících – duben ($96,2 \mu\text{g.m}^{-3}$), květen ($95,8 \mu\text{g.m}^{-3}$) a červen ($95 \mu\text{g.m}^{-3}$), které odpovídají jarním maximům v pozadových oblastech severní polokoule (Vingarzan, 2004). Pokles koncentrací přízemního ozonu v měsíci červenci na MS Churáňově je důsledkem tzv. kontinentálního monzunu, který má za následek zvýšenou oblačnost s vyšším výskytem srážek a poklesem slunečního záření. Tuto domněnku potvrzují i Váňa, Dejmal (2003). V měsíci srpnu lze sledovat opětovný nárůst koncentrací. Minimální koncentrace jsou zjišťovány v měsíci listopadu ($53,7 \mu\text{g.m}^{-3}$).

Během posledních 20 let bylo na řadě měřicích míst v Evropě i Severní Americe zjištěn pokles maximálních koncentrací přízemního ozonu v důsledku výrazného poklesu emisí prekurzorů ozonu. Rovněž se zjistilo, že dochází k nárůstu střední hodnoty přízemního ozonu v důsledku zvyšování úrovně pozadových koncentrací přízemního ozonu na severní polokouli (Brönnimann et al., 2000). Příčinou zvýšení je rychle rostoucí průmysl a intenzivní doprava v jihovýchodní Asii, přenos znečišťujících látek je umožněn pomocí mezikontinentálního transportu. V práci Auvray, Bey (2005) došli k závěru, že mezikontinentální přenos znečišťujících látek do Evropy pochází ze Severní Ameriky a Asie. Výsledky Mann – Kendallova neparametrického testu potvrzují pokles maximálních koncentrací přízemního ozonu na stanici Churáňov, které bylo hodnoceno pomocí 98% kvantilu, na 5%-ní hladině významnosti ($p = 0,029$). Výsledky testu pro koncentrace mediánu a aritmetického průměru nevykazují vzestupný trend, které jsou pozorované u jiných stanic v Evropě (Beike, Walasch, 2000). 98% kvantil přízemního ozonu je více citlivější na změnu prekurzorů než medián (De Leeuw, 2000). Výsledné hodnoty Mann – Kendallova testu pro koncentrace mediánu nevykazují ani rostoucí ani klesající trend ($p = 0,189$), i přes řadu prací, kde je rostoucí trend mediánu potvrzen (Chevalier et al., 2007). Např. analýza trendů přízemního ozonu na dvou venkovských stanicích v Litvě neprokázaly žádné statisticky významné změny v ročním průměru, 95% a 25% kvantilu za období 1994 – 2004 jako na jiných evropských stanicích (Girgzdiene et al., 2007).

Průměrná koncentrace pozadí přízemního ozonu na severní polokouli je odhadována na 20 – 40 ppb. Dle modelu IPCC lze očekávat nárůst koncentrací pozadí do

roku 2100 na hodnotu 42 – 80 ppb (Vingarzan, 2004).

Z výsledků jednoduché lineární regrese (obr. 13 až 20) je patrné, že meteorologické prvky mají významný podíl na vzniku koncentrací přízemního ozonu. K stejnému závěru došel např. i Li et al. (2010). Tuto domněnku potvrzují i nízké roční koncentrace v roce 2009, kdy byly nepříznivé meteorologické podmínky pro fotochemický vznik přízemního ozonu a naopak roky 2003 a 2006, kdy byly naopak velmi příhodné podmínky a tím i odpovídající vysoké koncentrace přízemního ozonu.

Pomocí proměnných (GLRD, relativní vlhkost vzduchu, úhrn srážek, průměrná rychlost větru, průměrná teplota vzduchu a NO_x) bylo vysvětleno analýzou vícenásobné lineární regrese 55,4% variability koncentrací přízemního ozonu v období 2000 – 2009. Při současné úrovni koncentrace prekursorů přízemního ozonu jsou meziroční rozdíly v koncentracích ozonu dány především uvedenými meteorologovými proměnnými a vliv koncentrací prekursorů není tak významný (ČHMÚ, 2010; Li et al., 2010; Girgzdiene et al., 2007).

Na stanici Churáňov dochází ke každoročnímu překračování cílového imisního limitu pro ochranu lidského zdraví v období 1997 – 2008. Nejvyšší 8hodinový průměr ($199,6 \mu\text{g.m}^{-3}$) byl zjištěn 13. 8. 2003, podobně vysoká koncentrace ($192,4 \mu\text{g.m}^{-3}$) byla zjištěna 6. 5. 2006. Nejvyšší počet překročení imisní limity $120 \mu\text{g.m}^{-3}$ došlo v roce 2006, díky příznivým meteorologickým podmínkám byla limitní koncentrace 136krát překročena.

V období 2005 – 2008 bylo zaznamenáno na Churáňově nejvyšší počet překročení cílového imisního limitu přízemního ozonu pro ochranu zdraví lidí na celém území ČR (ČHMÚ, 2006; ČHMÚ, 2007; ČHMÚ 2008; ČHMÚ, 2009).

Za sledované období 1995 – 2009 došlo na stanici Churáňov k překročení zvláštního imisního limitu pro přízemní ozon ($180 \mu\text{g.m}^{-3}$) během pěti let (1995, 1996, 1998, 2003, 2006). 49 překročení (téměř polovina všech překročení) bylo měřeno v roce 2006, v roce 2003 bylo zjištěno 28 překročení (ČHMÚ, 2010).

Porovnání koncentrací oxidů dusíku a přízemního ozonu ukazuje na nízké koncentrace NO_x . V blízkosti MS Churáňov se nenachází významný zdroj emisí oxidů dusíku a proto nedochází k významnějšímu odbourávání přízemního ozonu titrací NO (3) kvůli nízkým koncentracím oproti místům s vyššími koncentracemi oxidů dusíku (oblasti zatížené dopravou). Typickými místy, kde vysoké koncentrace NO_x odbourávají přízemní ozon, jsou např. centra měst (Cermanová, Volná, 2012).

U expozičního indexu AOT 40F byla každoročně překračována kritická hodnota pro ochranu lesů 5 ppm.h. Výše překročení během sledovaného období se lišila příhodnými meteorologickými podmínkami pro vznik ozonu. Při vhodných podmínkách pro přízemní ozon v roce 2006 došlo k 6,9krát překročení kritické hodnoty. Nicméně i v roce 2009, kdy byly méně příznivé podmínky pro vznik přízemního ozonu, došlo k překročení kritické hodnoty 1,9krát. Jedny z nejvyšších hodnot AOT 40F v roce 2006 v ČR a tím spojeno i překročení kritické hodnoty pro ochranu lesů, byly zjištěné na Šumavě a v Novohradských horách oproti roku 2003, kdy vysoké hodnoty expozičního indexu AOT 40F byly měřeny na celém území ČR (Hůnová, Schreiberová, 2012). Hodnoty zjištěné na Churáňově odpovídají expozičním indexům AOT 40F měřeným i v jiných pozadových oblastech ČR (Hůnová, Coňková, 2009). Vysoké hodnoty expozičního indexu AOT 40F neznamenají automaticky fyziologickou dávku pro rostliny. Účinky přízemního ozonu závisí na celé řadě faktorů, které mohou ovlivnit příjem přízemního ozonu vegetací, stomatální tok a reakci rostliny (Gasche et al., 2002). Stomatální vodivost je významným regulátorem toku přízemního ozonu a je ovlivněna slunečním zářením, teplotou a vlhkostí (Wieser et al., 2000). Pro posouzení fytotoxicity přízemního ozonu na vegetaci (US EPA, 1996) na území Šumavy nejsou k dispozici bližší studie, které by potvrzovaly negativní následky přízemního ozonu na vegetaci a ekosystémy. Domnívám se, že by bylo vhodné se zaměřit na hlubší studium tohoto problému a na ověření toho, zda vysoký fytotoxický potenciál přízemního ozonu na Šumavě vyvolává poškození vegetace.

Hodnota $65 \mu\text{g.m}^{-3}$, která představuje průměrnou směrnou denní koncentraci na ochranu vegetace vytvořené dle směrnice 92/72/EHS, je překračována během celého období studie velmi často i v studeném období roku. V extrémních podmínkách dochází k překračování denně v teplé části roku v letech 1997, 1998, 1999, 2003. Hodnota $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ je podobně překračována i v jiných horských oblastech ČR (Hůnová et al., 2010). Zjištěné koncentrace odpovídají až několikanásobnému překročení 24 hodinové kritické koncentrace $65 \mu\text{g.m}^{-3}$ téměř ve všech dnech v období duben až září za studované období.

Víkendový efekt přízemního ozonu (vyšší koncentrace přízemního ozonu o víkendů oproti koncentracím pracovních dnů) byl zjištěn na 5%-ní hladině významnosti pouze v chladné části roku a rovněž ve srovnání nedělních koncentrací s koncentracemi během pracovních dnů v studené polovině roku. Výsledky, které ukazují na víkendový efekt pouze v chladné části potvrzují i výsledky Borovanský, Kastner (2007). Na nízkou úroveň víkendového efektu přízemního ozonu na Churáňově má podstatný faktor vysoká úroveň

koncentrací přízemního ozonu v oblasti. Statistické zhodnocení ukazuje, že intenzita víkendového efektu roste s klesající úrovní koncentrací přízemního ozonu, korelační koeficient $r = -0,87$ (Borovanský, Kastner, 2007). Výsledek potvrzuje i fakt, že víkendový efekt přízemního ozonu je nejsilnější v dopravně zatížených oblastech (Blanchard, Tanenbaum, 2006). Domnívám se, že snížení koncentrací přízemního ozonu během víkendových dnů v teplé části roku lze přisoudit k zvýšenému přísunu emisí NO_x , které vedou k odstranění přízemního ozonu, vlivem vyšší dopravy. Lokalita Churáňov patří mezi vyhledávané rekreační lokality.

Pro bližší posouzení přízemního ozonu na Šumavě mi chyběly informace o VOC. Dá se předpokládat, že emise biogenních těkavých organických látek (BVOC), mezi které patří např. isopren, monoterpeny, mohou mít významný vliv na vznik koncentrací přízemního ozonu, neboť významným zdrojem VOC jsou lesy. Zalesněná plocha NP Šumava je 54 100 ha, což odpovídá 80% celkové plochy (Internet 2).

5. Závěr

Zjištěné výsledky ukazují na roční chod přízemního ozonu na stanici Churáňov. V sledovaném období 1995 – 2009 byly naměřeny nejvyšší průměrné měsíční koncentrace v dubnu ($96,2 \mu\text{g.m}^{-3}$), květnu ($95,8 \mu\text{g.m}^{-3}$), červnu ($95 \mu\text{g.m}^{-3}$) a nejnižší v listopadu ($53,7 \mu\text{g.m}^{-3}$). Nejvyšší roční koncentrace byly zjištěny v letech 2006 ($94,3 \mu\text{g.m}^{-3}$) a 2003 ($88,3 \mu\text{g.m}^{-3}$). Průměrná roční koncentrace za sledované období 1996 – 2009 byla $79,4 \mu\text{g.m}^{-3}$. Během teplého období (duben – září) jsou zjišťovány koncentrace přízemního ozonu o $10,3 \mu\text{g.m}^{-3}$ vyšší než je roční průměr.

Na stanici Churáňov dochází ke každoročnímu překračování cílového imisního limitu pro ochranu lidského zdraví v období 1997 – 2007. Nejvyšší 8hodinový průměr ($199,6 \mu\text{g.m}^{-3}$) byl zjištěn 13. 8. 2003. K překročení zvláštního imisního limitu pro přízemní ozon ($180 \mu\text{g.m}^{-3}$) došlo v pěti letech, 49 překročení (49% všech překročení) bylo měřeno v roce 2006.

U expozičního indexu AOT 40F dochází ke každoročnímu překračování. Výše překročení se liší v jednotlivých letech dle meteorologických podmínek pro vznik ozonu. Při vhodných podmínkách pro vznik přízemního ozonu v roce 2006 došlo k překročení kritické hodnoty 5 ppm.h 6,9krát, v roce 2009 kdy byly méně příznivé podmínky došlo k překročení 1,9krát.

Pomocí proměnných (GLRD, relativní vlhkost vzduchu, úhrn srážek, průměrná rychlost větru, průměrná teplota vzduchu a NO_x) bylo vysvětleno 55,4 % variability koncentrací přízemního ozonu v období 2000 – 2009.

Na MS Churáňov byl potvrzen klesající trend přízemního ozonu hodnoceném pomocí 98% kvantilu. U aritmetického průměru a mediánu přízemního ozonu nebyl potvrzen rostoucí ani klesající trend.

Víkendový efekt přízemního ozonu byl zjištěn na 5%-ní hladině významnosti pouze v chladné části roku a rovněž ve srovnání nedělních koncentrací s koncentracemi během pracovních dnů v studené polovině roku.

6. Použité zdroje informací

6.1. Použitá literatura

Ashmore, M. R., Fuhrer, J. (2000): New Directions: Use and Abuse of the AOT40 Concept. *Atmospheric Environment*, 34, p. 1157-1158.

Ashmore M. R. (2003): Surface Ozone Effects on Vegetation. In: Holton J. R., Curry J. A. and Pyle J. A. [eds.]: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. Academic Press, Elsevier Science, London, p. 1 663 – 1 671.

Auvray, M., Bey, I. (2005): Long-range transport to Europe: Seasonal variations and implications for the European ozone budget, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*. 110, 22p.

Bednařík J. (2002): Stručná klimatografie Churáňova. In: Staněk J. [ed.]: 50 let meteorologické stanice Churáňov. ČHMÚ, Praha, str. 33 – 65

Beilke, S., Wallasch, M. (2000): The ozone concentration in Germany since 1990 and prognoses for the future development. *Immissionschutz*, 5, p. 149–155.

Blanchard Ch. L., Tanenbaum (2006): Weekday/Weekend differences in ambient air pollutant concentrations in Atlanta and the southeastern United States. *Air, Waste Manage. Assoc.*, 56, p. 271 – 284.

Borovanský J., Kastner J. (2007): Víkendový efekt přízemního ozonu v České republice. *Meteorologické zprávy*, 60, str. 117 – 125.

Brace S., Peterson D. L. (1998): Spatial patterns of tropospheric ozone in the Mount Rainier region of the Cascade Mountains, USA *Atmospheric Environment*, 32, p. 3629–3637.

Brádka J. (1970): Srážky v závětrří Šumavy při západní cyklonální povětrnostní situaci. *Meteorologické Zprávy*, 23, č. 5, str. 140 – 144.

Breusch T. S., Pagan A. R. (1979): Simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica* (The Econometric Society), 47 (5), p. 1287 – 1294.

Brönnimann, S., Schuepbach, E., Zanis, P., Buchmann, B., Wanner, H. (2000): A climatology of regional background ozone at different elevations in Switzerland (1992–1998). *Atmospheric Environment*, 34, p. 5191– 5198.

Bytnerowicz A., B. Godzik, K. Grodzinska, W. Fraczek, R. Musselmann, W. Manning, O. Badea, F. Popescu, P. Fleischer (2004): Ambient ozone in forests of the Central and Eastern European mountains, 130, p. 5–16.

Cermanová L., Volná V. (2012): Koncentrace přízemního ozonu na stanicích ČHMÚ v Moravskoslezském a Olomouckém kraji, 1993 – 2009. Ochrana ovzduší, 24 (44), č.1, str. 13 – 16.

Coufal L. (1963): Větrné poměry Churáňova. Meteorologické Zprávy, 16, č. 2, str. 41 – 45.

ČHMÚ (2006): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2005. ČHMÚ Praha.

ČHMÚ (2007): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2006. ČHMÚ Praha.

ČHMÚ (2008): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2007. ČHMÚ Praha.

ČHMÚ (2009): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2008. ČHMÚ Praha.

ČHMÚ (2010): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2009. ČHMÚ Praha.

ČHMÚ (2011): Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2010. ČHMÚ Praha.

De Leeuw, F. A. A. M. (2000): Trends in ground level ozone concentrations in the European Union. Environmental Science & Policy, 3, p. 189–199.

EC (2002): Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of the 12 February 2002 relating ozone in ambient air. OJEC, No. L 67, p. 14-30.

EEA (2009): Spatial assessment of PM10 and ozone concentrations in Europe (2005). EEA Technical report No. 1/2009.

Fiala J., Ostatnická J. [eds.] (2003): Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech, Česká republika. ČHMÚ, Praha.

Fiala J., Závodský D. (2003): Chemické aspekty znečištěného ovzduší – troposférický ozon. Ochrana ovzduší, 15 (35), č. 3, příloha str. 8-12.

Fiore, A. M., Jacob, D. J., Bey, I., Yantosca, R. M., Field, B. D., Wilkinson, J. G. (2002): Background ozone over the United States in summer: origin and contribution to pollution episodes. Journal of Geophysical Research 107 (15), ACH 11-1–ACH 11-25.

Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. (1997): Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons, and particles. Science, 276, p. 1045–1051.

Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N. (2000): Chemistry of the Upper and Lower

Atmosphere. Academic Press, San Diego, CA, pp 969.

Fory T., Hladík M., Roubal Z. (2009): Plzeňský kraj – problematika imisí. *Ochrana ovzduší*, 21 (41), č. 3, str. 15 – 20.

Fuhrer, J., Skarby, L., Ashmore, M. R., (1997): Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97, p. 91–106.

Fusco, A. C., Logan, J. A. (2003): Analysis of 1970–1995 trends in tropospheric ozone at Northern Hemisphere midlatitudes with the GEOS-CHEM model. *Journal of Geophysical Research*, 108, ACH 4.1–ACH 4.25.

Gasche R., Papen H., Renneberg H. (2002): Trace Gas Exchange in Forest Ecosystems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Girgzdiene R., Bycenkiene S., Girgzdys A. (2007): Variations and trend of ground-level ozone and AOT 40 in the rural area of Lithuania. *Environmental Monitoring and Assessment*, 127, p. 327–335.

Guiherit, R., Roemer, M., (2000): Tropospheric ozone trends. *Chemosphere-Global Change. Science*, 2, p 167–183.

Hůnová I., Novák V. (2001): Expoziční index AOT40 jako nástroj pro odhad účinku přízemního ozonu na ekosystémy. *Meteorologické zprávy*, 54, č. 3, str. 35-47.

Hůnová I., Coňková M. (2009): Fytotoxický potenciál přízemního ozonu pro lesy v České republice. *Meteorologické zprávy*, 69, č. 3, str. 73-79.

Hůnová I., Novotný R., Uhlířová H., Vráblík T., Horálek J., Lomský, Šrámek V. (2010): The impact of ambient ozone on mountain spruce forests in the Czech Republic as indicated by malondialdehyde. *Environmental Pollution*, 158, p. 2393 – 2401.

Hůnová I., Schreiberová M. (2012): Ambient ozone phytotoxic potential over the Czech forests as assessed by AOT40. *iForest*, p. 153 – 162. – doi:10.3832/for0617-005.

Chevalier A., Gheusi F., Delmas R., Ordonez C., Sarrat C., Zbinden R., Thouret V., Athier G., Cousin J-M. (2007): Influence of altitude on ozone levels and variability in the Loir troposphere: a ground-based study for western Europe over the period 2001-2004, *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 7, p. 1327-1356.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881pp

Jones M. E., Paine T. D., Fenn M. E., Poth M. A. (2004): Influence of ozone and nitrogen deposition on bark beetle activity under drought conditions. *Forest Ecology and*

Management, 200, p. 67 – 76.

Křivancová S. (1991): Teplotní zvláštnosti Šumavy. Meteorologické Zprávy, 44, č. 5, str. 143 – 149.

Křivancová S. (1999): Doplnění poznatků o teplotních zvláštnostech Šumavy. In: Polcar P. [ed.]: Sborník prací ČHMÚ Sv. 47. ČHMÚ, Praha, str. 47 – 51.

Křivancová S. (2002): Základní charakteristiky větru na Churáňově. In: Staněk J. [ed.]: 50 let meteorologické stanice Churáňov. ČHMÚ, Praha, str. 66 – 70.

Li H. C., Chen K. S., Huang C. H., Wang H. K. (2010): Meteorologically adjusted long-term trend of ground-level ozone concentrations in Kaohsiung County, southern Taiwan. Atmospheric Environment, Vol. 44, p. 3605 – 3608.

Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M., Wanner H. (2004): European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. Science, 303 (2004), p. 1499–1503.

Lux D., Leonardi S., Müller J., Wiemken A., Flückiger W. (1997): Effects of ambient ozone concentrations on contents of non-structural carbohydrates in young *Picea abies* and *Fagus sylvatica*. New Phytologist, 137, p. 399 – 409.

Meloun M., Militký J. (1994): Statistické zpracování experimentálních dat. Praha, Plus, p. 839.

Meloun M., Militký J. (2002): Kompendium statistického zpracování dat. Academica, Praha, str. 431 – 539.

Monks, P. S. (2000): A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. Atmospheric Environment, 34, p. 3545-3561.

Nekovář F. (1966): Některé zvláštnosti jihočeského klimatu, I. část. - Pedagogická fakulta, České Budějovice

Ostatnická, J. (2007): Imisní monitoring českého hydrometeorologického ústavu, *Ochrana ovzduší*, 2007, 20, č. 1, str. 3 – 5.

Sánchez, M. L., García, M. A., Pérez, I. A., Torre, B. (2008): Evaluation of surface ozone measurements during 2000-2005 at a rural area in the upper Spanish plateau. Journal of atmospheric chemistry, 60, p. 137- 152.

Shapiro S. S., Wilk M. B. (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika 52 (3 – 4), p. 591 – 611.

Sicard P., Coddeville P., Galloo J. C. (2009): Near-surface ozone levels and trends at rural stations in France over the 1995–2003 period. Environmental monitoring assessment, 156, p. 141–157.

Simpson D., Ashmore M. R., Emberson L., Tuovinen J. P. (2007): A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study. *Environmental Pollution*, Vol. 146, p. 715 – 725.

Sitch S., Cox P. M., Collins W. J., Huntingford C. (2007): Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land – carbon sink. *Nature*, Vol. 448, p. 791 – 794.

Skelly M., Ferdinand J. A., Savage J. E., Jagodzinski J. M., Mulik J. D. (2001): A 13-week comparison of passive and continuous ozone monitors at forested sites in north-central Pennsylvania. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 51, p. 1280–1287

Solberg S., Hov O., Sovde A., Isaksen I. S. A. (2008): European Surface Ozone in the Extreme Summer 2003. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113.

Staehelin J., Thudium J., Buehler R., Volz-Thomas A., Graber W. (1994): Trends in Surface Ozone Concentrations at Arosa (Switzerland). *Atmospheric Environment* 28 (1), p. 75–87.

Stevenson D. (2001): Global Influences on Future European Tropospheric Ozone. Proceedings from the Eighth European Symposium on the Physico–Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants 17–20 September, 2001, Torino, Italy; <http://ies.jrc.cec.eu.int/Units/cc/events/torino2001/torinocd/Documents/Urban/UO7.htm>.

Strnad E. (2003): Podnebí Šumavy. In: Anděra M., Zavřel P. [eds.]: Šumava, příroda, historie a život. - Baset, Havlíčkův Brod, str. 35 – 44.

Stroh K. (2004): Bodennahes Ozon. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. Umweltberatung Bayern, 8 s.

Sundberg J., Karlsson P. E., Schenk L., Pleijel H. (2006): Variation in ozone concentration in relation to local climate in West Sweden. *Water, Air and Soil Pollution*, 173, p. 339-354.

Symon K., Bencko V. (1988): Znečištění ovzduší a zdraví. Avicenum, Praha, str. 86 – 99.

Tolasz R. (2009): Meteorologie a klimatologie tvoří v českém hydrometeorologickém ústavu nedělitelný systém. *Meteorologické zprávy*, 62, str. 143 – 147.

Uhlířová H., Hůnová I., Novotný R., Lomský B., Horálek J. (2003): Oxidační stres v podmínkách horských smrčín. *Zprávy lesnického výzkumu*, 48, str. 200 – 205.

US EPA (1996): Air Quality Criteria for Ozone and Other Photochemical Oxidants. Vol II. EPA – 600/P-93/06bF. Research Triangle Park, NC.

Váňa M., Dejmál K. (2003): Trendy koncentrací přízemního ozonu na českých regionálních stanicích programů GAW a EMEP Košetice a Svratouch. Meteorologické zprávy, 56, str. 80 – 86.

Vingarzan, V. (2004): A review of surface ozone background levels and trends, Atmospheric Environment, 38, p. 3431–3442.

Volz, A., Kley D. (1988): Evaluation of Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century. Nature, Vol. 332, p. 240 – 242.

Vystrčilová D. (1996): Směrnice pro kvalitu ovzduší v Evropě. 1. vydání Praha, Ministerstvo životního prostředí ČR, str. 308 – 309.

Werner B., Spranger T. (1996): Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas where they are Exceeded, UN ECE CLRTAP. Berlin, UBA, p. 204.

Wieser G., Häslér R., Götz B., Koch W., Havranek W. M. (2000): Role of climate, crown position, tree age and altitude in calculated ozone flux into needles of Picea abies and Pinus cembra: a synthesis. Environmental Pollution 109, 415-422.

Wieser G., Tausz M., Wonisch A., Havranek W. M. (2001): Free radical scavengers and photosynthetic pigments in Pinus cembra L. needles as affected by ozone exposure. Biologia Platarum, 44, p. 225–232.

Wieser G., Manning W. J., Tausz M., Bytnerowicz A. (2006): Evidence for potential impacts on Pinus cembra L., at mountain sites in Europe: an overview Environmental Pollution, 139, p. 53–58.

Yienger, J. J., Galanter, M., Holloway, T. A., Phadinx, M. J., Guttikunda, S. K., Carmichael, G. R., Moxim, W. J., Levy I. H. (2000): The episodic nature of air pollution transport from Asia to North America. Journal of Geophysical Research 105 (26), p. 931–945.

Zákon č. 201 ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 2012, částka 69, str. 2786 – 2848.

Závodský D., Závodská E. (1993): Vplyv globalnych klimatických zmien na chemizmus troposféry. Meteorologické zprávy, 46, str. 106 -110.

Zvára K. (2003): Biostatistika. Nakladatelství Karolinum, Praha, str. 149 – 168.

6.2 Internetové zdroje

Internet 1: http://lide.uhk.cz/fim/student/svitael1/web/kraje_cr.html (10.3.2012)

Internet 2: <http://www.npsumava.cz/cz/1261/sekce/zakladni-udaje> (11.7.2012)